

# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

10011010011011111001100100011000101001110100100011000110101011110100001001001010010011  
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010  
110010111100010011000011011011101110100010011010011100100010100101000110101110100001  
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110010010101101010010011001110  
11010110000101011110100101001101101010110001011010101101001010011101010101101001101001  
10011010011011111001100100011000101001110100100011000110101011110100001001001010010011  
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010  
110010111100010011000011011011101110100010011010011100100010100101000110101110100001  
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110010010101101010010011001110  
11010110000101011110100101001101101010110001011010001100001010011101010001101001101001

№ 2 (40) Т. 2 2018



0100011011000001101101100010100100111010011100111010011101001110100110101000011101100111001010  
110010111100010011000011011011101110100010011010011100100010100101000110101110100001  
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110010010101010010011001110  
110101100001010111101001010011011010101100010110101011010010100111010101 101001  
10011010011011111001100100011000101001110100101011000110101011110101101 1010  
01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000010 011





# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 2 (40) Т.2 2018 [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)

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

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

**Главный редактор:**

**Н.В. Никитин, д.т.н., профессор**

**Редакционный Совет**

**Сопредседатели**

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

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

**Члены Совета**

Е.М. Апполонов, д.т.н. генеральный директор ЦКБ «Лазурит»

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

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

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

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

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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

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

**Редакционная коллегия**

**Заместители главного редактора**

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

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

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

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

**Члены Редколлегии**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Периодичность издания** — 4 номера в год

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://vak.ed.gov.ru>

**Журнал включен в Перечень ВАК ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук и в международную реферативную базу данных Web of Science**

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

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

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

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

**190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3**

**Телефон/факс +7 (812) 513-04-51,**

**e-mail: [mit-journal@mail.ru](mailto:mit-journal@mail.ru)**

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

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

**Редакционная этика журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

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

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

**Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ»**

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова





# MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 2 (40) V. 2 2018 [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru) ISSN 2073-7173, ISSN 2588-0233

Subject: shipbuilding, computer science,  
computer engineering and management

Chief Editor:

N. V. Nikitin, Doctor of Engineering, Professor

## Editorial Board

### Co-chairmen

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

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

### Council Members

E.M. Appolonov, Doctor of Engineering, CEO «Lazurit Central  
Design Bureau»

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

D. V. Nikushchenko, Doctor of Engineering, Professor, Vice-  
Rector for Research, Saint-Petersburg State Marine Technical  
University

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

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

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

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

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

#### Members of Editorial Staff

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### Publication frequency — 4 issues per year

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

**The magazine is included into the List of Supreme  
Attestation Commission of leading reviewed scientific  
magazines and editions, in which basic scientific results of  
theses for application of science-degrees of Doctor and  
Candidate of Science shall be published and in the  
international abstract Web of Science database.**

Manuscripts are to be submitted to the editorial office in  
electronic form (on CD or via E-mail: [mit-journal@mail.ru](mailto: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](mailto: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/](http://morintex.ru/en/nauchnyj-zhurnal/redakcionnaya-etika/)

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova



# 51 центральный конструкторско-технологический институт судоремонта

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

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

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

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

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

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





## СОДЕРЖАНИЕ

О журнале .....	стр 8
К 75-летию Дмитрия Алексеевича Скороходова.....	10
<b>КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ</b>	
<b>Балабанов Б.А., Ляпидов К.С., Турусов С.Н.</b> Состояние, тенденции и перспективы развития корабельной электротехники .....	13
<b>ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА</b>	
<b>Острик А.В., Терновой В.Я., Николаев Д.Н.</b> Методы экспериментального исследования механического действия импульсных потоков излучений на тонкостенные конструкции .....	21
<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ</b>	
<b>Каймаков И.С., Крюков М.С., Николаева А.А., Февральских А.В.</b> Исследование формы руля в составе компоновки водометного движителя судна с воздушной каверной по результатам CFD-моделирования .....	27
<b>ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА</b>	
<b>Нго Ж.В.</b> Моделирование процесса компенсации отклонений трасс трубопроводов судовых систем (на английском языке) .....	34
<b>Герасимов Н.И., Грачев И.В.</b> К вопросу центрирования тяжеловесных сборочно-монтажных единиц .....	40
<b>Во Ч.К., Сахно К.Н.</b> Применение теории размерных цепей к расчёту отклонений трасс судовых трубопроводов.....	47
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)</b>	
<b>Иванов В.Г., Степанов И.В., Томов А.А.</b> К вопросу выбора электродвигателей гребных электроприводов необитаемых подводных аппаратов.....	52
<b>Глушков С.П., Глушков С.С., Кочергин В.И., Лебедев Б.О.</b> Анализ динамических характеристик крутильно-колебательных систем судовых энергетических установок.....	59
<b>Герасимов В.А., Комлев А.В., Красковский М.В., Филоженко А.Ю.</b> Токовая разгрузка системы бесконтактной передачи электроэнергии на подводный аппарат.....	67
<b>Ищенко А. Д., Роечко В. В., Малыгин И.Г, Комашинский В.И.</b> Инновации в тушении пожаров энергетических установок и помещений судов (кораблей).....	73
<b>Ищенко А.Д., Чистяков Т.И., Малыгин И.Г, Вислогузов В.В.</b> Электробезопасность при тушении пожаров класса Е энергетических установок и помещений судов (кораблей).....	81
<b>Соломахин Ю. В., Цыганкова Л.П., Фершалов А.Ю.</b> Потери кинетической энергии на вентиляцию газа в парциальных малогабаритных осевых турбинных ступенях.....	90
<b>Тепляков М. В., Лошенко М. Д.</b> О влиянии ёмкости проводников и характеристик изоляционных материалов на токи потерь в корабельных гермовводах.....	95
<b>Темникова А.А., Рубан А.Р.</b> Оптимизация выбора главного судового двигателя .....	102
<b>Опра Д.П., Гнеденков С.В., Синебрюхов С.Л., Соколов А.А., Войт Е.И., Минаев А.Н., Железнов В.В.</b> Фундаментальные проблемы применения литий-ионных аккумуляторов в области морских технологий .....	108

**ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

**Василенко А.М., Пятакович В.А., Рычкова В.Ф.** Интеллектуальная система нейросетевой классификации морских целей..... 115

**Василенко А.М., Пятакович В.А., Рычкова В.Ф.** Способ классификации подводных технических объектов экспертной интеллектуальной системой с приемной параметрической антенной..... 121

**УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

**Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л.** Управление движением судов на подводных крыльях в нормальных и аварийных ситуациях..... 127

**Круглеевский В.Н., Маринов М. Л., Скороходов Д.А.** Информационно-аксиологические аспекты автоматизации контроля пожарной опасности на морских и речных судах..... 137

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ****УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**Гнатюк В.И., Меркулов А.А., Яфасов А.Я.** Универсальная модель организации как инструмент реализации целостного подхода в управлении социально-экономическими системами..... 143

**Исаев А.А., Мегей Е.С.** Методика оценки конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок..... 155

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

**Таранцев А.А., Фахми Ш.С., Шаталова Н.В.** Принципы математического описания логических схем..... 160

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ**

**Димитриенко Ю.И., Захаров А.А.** Компьютерные технологии разработки препроцессора программного комплекса SIGMA для моделирования конструкций (на английском языке) ..... 168

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**Девятисильный А.С., Гриняк В.М., Шурыгин А.В.** Модели и алгоритмы оценивания кинематических параметров движения объекта по данным его позиционирования..... 175

**ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ**

**Недоступ А.А., Ражев А.О.** Имитационное моделирование работы радара рыболовного тренажерного комплекса с использованием цифровых моделей рельефа SRTM ..... 181



CONTENTS

About journal .....	page	8
---------------------	------	---

For Dmitry Skorokhodov 's 75-th anniversary .....	10
---	----

SHIP BUILDING

<b>Boris A. Balabanov, Konstantin S. Lyapidov, Sergey N. Turusov</b> Current state, trends and development prospects in marine electrical engineering t .....	13
---	----

THEORY OF SHIP AND STRUCTURES

<b>Afanasy V. Ostriuk, Vladimir Ya. Ternovoi, Dmitry N. Nikolaev</b> Methods of the experimental investigation of mechanical action from pulse fluxes of radiations on thin-walled constructions .....	21
--	----

SHIP DESIGNING AND STRUCTURE

<b>Ivan S. Kaimakov, Mikhail S. Kryukov, Alla A. Nikolaeva, Andrey V. Fevral'skikh</b> Investigation of rudder shapes in the composition of water jet propulsion unit air-cavern vessel based on results of CFD modelin ..	27
--	----

SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION

<b>Viet G. Ngo</b> Modeling deviation compensation of pipeline routes in ship systems (in English) .....	34
<b>Nikolay I. Gerasimov, Ivan V. Grachev</b> Centering of heavy-weight assembly and installation units of ship equipment.....	40
<b>Vo Trung Quang, Konstantin N. Sakhno</b> Application of the dimensional circuits theory on calculating the deflections of ship pipelines route.....	47

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

<b>Vladimir G. Ivanov, Ilya V. Stepanov, Alexander A. Tomov</b> An issue of selecting electric motors for rowing drives of unmanned undersea vehicles.....	52
<b>Sergei P. Glushkov, Sergei S. Glushkov, Victor I. Kochergin, Boris O. Lebedev</b> Analysis of dynamic characteristics torsional and oscillatory systems of ship power propulsion plants.....	59
<b>Komlev, Mikhail V. Kraskovskiy, Aleksey Yu. Filozhenko</b> The current unloading of the contactless power transmission system to the underwater vehicle.....	67
<b>Andrey D. Ishchenko, Vladimir V. Roenko, Igor G. Malygin, Vladimir I. Komashinsky</b> Innovations in fire extinguishing of energy installations and vessels (ships).....	73
<b>Andrey D. Ishchenko, Timur I. Chistjakov, Igor G. Malygin, Victor V. Visloguzov</b> Electric protection in fire extinguishing of class E energy installations and premises of vessels (ships).....	81
<b>Yuriy V. Solomakhin, Lyudmila P. Tsigankova, Andrey Y. Fershalov</b> Losses of kinetic energy in friction and ventilation in partial small-scale turbine steps.....	90
<b>Michael V. Teplyakov, Margarita D. Loshenko</b> About influence of capacity of conductors and characteristics of insulating materials on currents of losses in the ships cable entry seals.....	95
<b>Alena A. Temnikova, Anatoly R. Ruban</b> Optimization of selection of main ship engine.....	102
<b>Opra D.P., Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Sokolov A.A., Voit E.I., Minaev A.N., Zhelezov V.V.</b> Fundamental problems of Lithium-ion batteries application in the area of marine technologies .....	108

INFORMATION SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL SYSTEM ANALYSIS

<b>Valeriy A. Pyatakovich, Anna M. Vasilenko, Victoria F. Rychova</b> Intelligent system of neural network classification of marine target.....	115
---	-----

**Valeriy A. Pyatakovich, Anna M. Vasilenko, Victoria F. Rychova** A method to classify underwater technical objects by using an expert intelligent system with receiving parametric antenna..... 121

**CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION**

**Valery Yu. Kaminsky, Marin L. Marinov, Dmitriy A. Skorokhodov, Alexey L. Starichenkov** Motion control of hydrofoil vessels in normal and emergency situations..... 127

**Vladimir N. Krugleevsky, Marin L. Marinov, Dmitriy A. Skorokhodov** Informational-axiological aspects of automation of control of fire danger at sea and river vessels..... 137

**AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS  
CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS**

**Victor I. Gnatyuk, Alexander A. Merkulov, Abdurashid Ya. Yafasov** Universal model of the organization as a tool for implementation of the integral approach in the management of social and economic systems 143

**Alexander A. Isaev, Ekaterina S. Megey** Method of assessing the competitiveness of cabotage cargo maritime transport..... 155

**SOFTWARE FOR COMPUTERS**

**Alexander A. Tarantsev, Shakeeb S. Fahmi, Natal'ja V. Shatalova** Principles of the mathematical description of logic circuits..... 160

**COMPLEXES AND COMPUTER NETWORKS**

**Yury I. Dimitrienko, Andrey A. Zakharov** Computer technologies of development of preprocessor of SIGMA software package for structural modeling (in English) ..... 168

**FOUNDATIONS OF INFORMATION SCIENCE MATHEMATICAL MODELLING**

**Aleksandr S. Devyatisilny, Viktor M. Grinyak, Artem V. Shurygin** Models and algorithms of estimation of the kinematic parameters of the object movement by its positioning..... 175

**NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS**

**Alexander A. Nedostup, Aleksey O. Razhev** Simulation modeling of a radar for a fishing gear simulator using digital elevation srtm models ..... 181



## О ЖУРНАЛЕ

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

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

**Журнал включен в Перечень ВАК ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.**

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

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2014 года и с № 3(25) 2014 полные выпуски размещены на сайте [www.morintex.ru](http://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 взаимодействия); информатика, вычислительная техника и управление (системный анализ, управление и обработка информации, автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, управление в социальных и экономических системах, математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей, системы автоматизации проектирования, теоретические основы информатики, математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)

## Основные направления

- Интеллектуальные технологии в проектировании кораблей и судов, компьютеризация процессов проектирования (управление и организация проектирования, системы автоматизированного проектирования). Морская история и техника.

- Интеллектуальные технологии в строительстве и ремонте кораблей и судов (перспективные технологии в строительстве и ремонте судов, автоматизированные системы подготовки производства, использование роботов).

- Интеллектуальные технологии в эксплуатации кораблей и судов (системы автоматизации кораблей и судов, автоматизированные системы управления, проблемы судовой эргономики, экология).

- Интеллектуальные технологии в прикладных исследованиях (математическое моделирование и компьютерный эксперимент, строительная механика, гидроаэродинамика, термодинамика, физические поля корабля).

- Интеллектуальные технологии в морской и судовой энергетике. Энергосберегающие технологии.

- Интеллектуальные технологии морского приборостроения.

- Искусственный интеллект в морских технологиях.

- Интеллектуальные технологии в маркетинговых исследованиях.

- Экономика и финансы в судостроении

- Кораблестроительное образование

## ABOUT JOURNAL

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

**The magazine is included into the List of Supreme Attestation Commission of leading reviewed scientific magazines and editions, in which basic scientific results of theses for application of science-degrees of Doctor and Candidate of Science shall be published.**

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

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

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

**Subscription index is 99366 in Interregional Subscription Agency.**

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

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

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



## К 75-ЛЕТИЮ ДМИТРИЯ АЛЕКСЕЕВИЧА СКОРОХОДОВА

16 февраля 2018 г. исполнилось 75 лет главному научному сотруднику лаборатории «Проблем безопасности транспортных систем» Института проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, заместителю главного редактора журнала «Морские интеллектуальные технологии», доктору технических наук, профессору капитану 1 ранга в отставке Дмитрию Алексеевичу Скороходову, одному из ведущих отечественных ученых в области создания корабельных интегрированных систем управления и безопасности транспортных систем.

После окончания школы Дмитрий Алексеевич в 1961 г. поступил на механический факультет Ленинградского Высшего инженерного морского училища им. адмирала С.О.Макарова, в 1963 г. приказом МО СССР он был переведён на электротехнический факультет Высшего Военно-Морского инженерного училища им. Ф.Э. Дзержинского, которое закончил в 1966 г. С 1966 г. по 1967 г. проходил службу в качестве инженера - электрика на Краснознаменном Северном Флоте. С 1967 г. по 1968 г. учился на курсах офицерского состава по скрытности и защите кораблей при Военно-Морской Академии. В 1968 г. Дмитрий Алексеевич был назначен в 1 ЦНИИ МО в отдел «Комплексной автоматизации технических средств кораблей ВМФ», где последовательно занимал должности младшего научного сотрудника, старшего научного сотрудника, начальника лаборатории и начальника отдела.

Под его руководством и непосредственном участии был создан авторулевой «Аист» и система автоматического управления «Штиль» для катера на подводных крыльях проекта 206М,

комплексный тренажер по управлению движением и техническими средствами корабля на воздушной подушке «Кальмар» проекта 1206, система управления движением КВП «Джейран» проекта 12321. Дмитрий Алексеевич осуществлял военно-научное сопровождение систем управления движением «Коралл» и «Стрела» для кораблей на подводных крыльях «Ураган» и «Сокол» проектов 1240, 1141, комплексных систем управления движением и техническими средствами «Орион-КА», «Орион-КАТ», «Флора», «Флора-32», кораблей на воздушной подушке «Кальмар» проекта 1206, «Омар» проекта 1209, «Зубр» проекта 12322, корабля на подводных крыльях проекта 11451 и системы «Смена-3» для корабля - экраноплана «Лунь» проекта 903.

В 1987 г. Дмитрий Алексеевич Скороходов был назначен главным наблюдающим за комплексом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию технических средств диагностирования надводных кораблей и подводных лодок «Диагноз-2» и по внедрению систем информационной поддержки на надводные корабли и подводные лодки. Под его руководством был составлен план внедрения этих систем, как на проектирующиеся, так и на эксплуатирующиеся корабли и подводные лодки ВМФ.

В 1988 г. состоялась защита докторской диссертации на тему «Оптимизация основных характеристик систем автоматического управления движением кораблей с динамическими принципами поддержания». В 1992 г. ВАК присвоил Дмитрию Алексеевичу ученое звание «профессор» по специальности «Системы обработки информации и управления».



За время службы в 1 ЦНИИ МО (ныне Научно-исследовательский институт кораблестроения и вооружения ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия») профессором Д.А. Скороходовым и его учениками разработана совокупность методов, направленных на решение целого ряда сложных проблем в области создания автоматических систем управления техническими средствами кораблей ВМФ. Среди таких проблем, в решении которых в наибольшей мере проявился его талант исследователя, следует отметить: разработку общеметодологических основ обоснования характеристик систем управления и обработки информации кораблей и судов; разработки процедур оптимизации и декомпозиции целей управления техническими средствами кораблей и судов; обоснования показателей эффективности систем управления; обоснования технических требований к системам управления и обработки информации; развития системного подхода к диагностированию технических средств и создания систем интеллектуальной поддержки при борьбе с авариями на кораблях и судах; теоретическое и практическое решение задач оптимального и противоаварийного управления. Следует отметить его большую работу методологического плана по обоснованию концепции технического диагностирования и использования персональных ЭВМ на кораблях и судах ВМФ.

После увольнения в 1994 г. в запас Д.А. Скороходов работает в системе Российской академии наук ведущим научным сотрудником Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко, с 1996 г. главным научным сотрудником, с 1997 г. заведующим лабораторией «Проблем безопасности транспортных систем», с 2004 г. заместителем директора по научной работе, а с 2006 г. по настоящее время главным научным сотрудником лаборатории «Проблем безопасности транспортных систем» того же института.

С 1994 г. по 2002 г. работал по совместительству на должности профессора кафедры «Комплексные системы управления техническими средствами подводных лодок» Военно-Морского инженерного института, а с 1997г. по настоящее время на должности профессора кафедры «Корабельные системы управления» СПбГЭТУ (ЛЭТИ). При этом он создал следующие курсы:

- «Теория систем автоматического управления техническими средствами подводных лодок»;
- «Элементы систем автоматического управления»;
- «Интегрированные системы управления кораблём»;
- «Устройство и технические средства кораблей»;
- «Системный анализ и принятие решений».



На протяжении более 40 лет Дмитрий Алексеевич ведет активную научную работу. Под его руководством и при непосредственном участии в СПбГЭТУ выполнено более 30 НИР, посвященных различным аспектам организации, развития безопасности транспортной системы и совершенствования транспортных технологий региональных транспортных систем. Им сформировано и последовательно развивается новое фундаментальное направление науки «Теория безопасности транспортных систем», имеющее целью формулировку важнейших принципов развития отечественной транспортной отрасли. Благодаря инициативе и научным трудам Д.А. Скороходова Институт проблем транспорта им. Н.С.

Соломенко РАН стал ведущим центром развития безопасности в транспортной отрасли.

Дмитрий Алексеевич в настоящее время развивает следующие научные направления:

- Разработка общеметодологических основ обоснования характеристик систем управления и обработки информации транспортных систем.
- Разработка методов оптимизации систем управления движением кораблей с динамическими принципами поддержания.
- Теоретическое обоснование противоаварийных систем управления транспортными средствами.
- Теоретическое обоснование и научное руководство комплексом исследований по внедрению методов и средств технического диагностирования оборудования транспортных средств.
- Теоретическое обоснование методов и средств диагностирования и прогнозирования пожароопасной обстановки в помещениях транспортных средств.
- Разработка теории и методов оценки безопасности транспорта.



Профессором Д.А. Скороходовым сформирована научная школа, которая способствует решению сложных задач повышения эффективности систем управления движением, техническими средствами и системами обеспечения безопасности транспортных средств.

Д.А. Скороходов является автором более 400 научных работ, в том числе более 200 научных статей и докладов, более 60 НИР, 19 монографий, 4 учебников, 7 учебных пособий и методических указаний и 127 авторских свидетельств на изобретения, более 30 из которых внедрены на корабли ВМФ. Он постоянно ведет большую работу по подготовке научных кадров. Под его научным руководством 16 аспирантов, докторантов и соискателей успешно защитили кандидатские и докторские диссертации. В настоящее время он руководит тремя соискателями, активно помогает им в работе над диссертациями.

Профессор Д.А. Скороходов является членом докторских диссертационных советов по присуждению учёных степеней: Санкт-Петербургского государственного университета путей сообщения, Санкт-Петербургского государственного морского технического университета и Санкт-Петербургского государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О.Макарова.

Научная и организационная работа Д.А. Скороходова высоко оценена научной общественностью и Правительством страны. Он награжден многими медалями, а также знаком «Почетный работник транспорта России».

**Сердечно поздравляем Вас, уважаемый Дмитрий Алексеевич, с юбилеем и желаем Вам доб-рого здоровья, счастья и дальнейших успехов в Вашей плодотворной научной деятельности на благо Отечества!**

**КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ**

УДК 629.12.001.2

**СОСТОЯНИЕ, ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
КОРАБЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ****Борис Андреевич Балабанов**

заместитель директора по перспективным разработкам филиала «ЦНИИ СЭТ»  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»  
196128, Санкт-Петербург, ул. Благодатная., д.6  
тел. (812) 369-05-12 e-mail: b\_balabanov@ksrc.ru

**Константин Станиславович Ляпидов**

кандидат технических наук, заместитель директора по электротехнике и технологии филиала «ЦНИИ СЭТ»  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»  
196128, Санкт-Петербург, ул. Благодатная., д.6  
тел. (812) 748-52-37 e-mail: lks.spb27@mail.ru

**Сергей Николаевич Турусов**

доктор технических наук, профессор, генеральный директор  
Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт  
электромашиностроения (АО «ВНИТИ ЭМ»)  
196128, Санкт-Петербург, ул. Благодатная., д.2  
тел. (921) 752-65-44 e-mail: serniktur@yandex.ru

**Аннотация**

В статье определены основные тенденции развития корабельной электроэнергетики на основании результатов многофакторного анализа. Отмечено, что прогнозируемое в ближайшей перспективе увеличение энерговооруженности корабельных электроэнергетических систем (ЭЭС), потребует создания сетей распределения высокого напряжения. В связи с этим необходима разработка высоковольтного электрооборудования, при внедрении которого особое внимание необходимо уделить вопросам электромагнитной совместимости и стойкости к импульсным коммутационным перенапряжениям. Отдельно отмечается широкое внедрение на судах вспомогательного флота единых электроэнергетических систем (ЕЭЭС) с системами электродвижения (СЭД).

Рассмотрены вопросы создания основного электрооборудования для корабельных систем электродвижения (гребные электродвигатели, преобразовательная техника, коммутационно-защитная аппаратура, кабельная продукция), а также воздухонезависимых энергетических установок на базе электрохимических генераторов.

Показана необходимость внесения определенности и обеспечения согласованности в терминологической области корабельной электроэнергетики.

Для решения перспективных прикладных задач корабельной электротехники предлагается создать отдельную подпрограмму «Корабельная электротехника», охватывающую весь комплекс электротехнических изделий и материалов в обеспечение строительства перспективных кораблей. Также отмечена особая роль вновь созданного Центра компетенций по выполнению базовых функций в области корабельной электротехники и технологии электромонтажных работ.

**Ключевые слова** единые электроэнергетические системы, системы электродвижения, гребные электрические установки, корабельная электроэнергетика, корабельное электрооборудование, высоковольтное электрооборудование.

**CURRENT STATE, TRENDS AND DEVELOPMENT PROSPECTS IN MARINE  
ELECTRICAL ENGINEERING****Boris A. Balabanov**

Deputy Director on Advanced Development  
FSUE Krylov State Research Centre, SET RI Branch  
6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, 196128, Russian Federation,  
Phone: (812) 369-05-12  
E-mail: b\_balabanov@ksrc.ru

**Konstantin S. Lyapidov**

Ph.D in Engineering Science, Deputy Director of SET RI Branch  
on Electrical Engineering and Technology,  
FSUE Krylov State Research Centre, SET RI Branch  
6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, 196128, Russian Federation,

Phone: (812) 748-52-37  
E-mail: lks.spb27@mail.ru

**Sergey N. Turusov**

Doctor of Engineering Science, Professor, General Director of Russian Research, Development, Design, Engineering and Technology Institute of Electric Machine Engineering.

2, Blagodatnaya st., St. Petersburg, 196128, Russian Federation,

Phone: (921) 752-65-44  
E-mail: serniktur@yandex.ru

### Abstract

The fundamental trends in marine electrical engineering development based on the results of the multifactor analysis are revealed in this article. It was also shown that in the near future it is projected to increase the power loading of ship electric power systems (EPS), which requires the creation of high-voltage distribution networks. Under these circumstances the development of high-voltage electrical equipment becomes particularly important. The introduction of this equipment requires careful consideration of the issues of electromagnetic compatibility and resistance to impulse switching overvoltages. Active introduction of integrated power systems with electric propulsion systems on auxiliary ships is also noted.

The issues of creating the main electrical equipment for marine electric propulsion systems (propulsion motors, converter equipment, switching and protection equipment, cable products), as well as for air-independent power plants based on electrochemical generators, were considered.

It is necessary to clarify and ensure consistency of terminology in the field of the ship electric power engineering.

To solve promising application tasks in marine electrical engineering, it is proposed to create a separate sub-program "Marine electrical engineering", covering the entire range of electrical products and materials to ensure the construction of prospective ships. The special role of the newly established Center of Excellence for performing basic functions in the field of ship electrical engineering and electrical installation technology was also noted.

**Key words:** Integrated power systems, electric propulsion systems, electric propulsion plants, marine electrical power engineering, ship electrical equipment, high voltage electrical equipment.

### Введение

Современный корабль является сложнейшей технической системой, в которой особая роль отводится электроэнергетике. Сегодня невозможно представить корабельные системы и комплексы, способные функционировать без электрической энергии и, в этом смысле, корабли уже давно стали «электрическими» и все корабельные комплексы могут рассматриваться как потребители электрической энергии.

Основой корабельной электроэнергетики является электроэнергетическая система, рассматриваемая как совокупность источников электроэнергии, преобразователей, распределительных, регулирующих устройств и кабелей, объединенных процессом производства, преобразования и распределения электроэнергии.

В связи с этим в статье будут рассмотрены, в первую очередь, вопросы, связанные с состоянием и тенденциями развития современной корабельной электротехники.

### 1. Современное состояние корабельной электротехники

До настоящего времени основу корабельной энергетики составляют энергетические установки классического типа, созданные в 70-80 годы прошлого века. Именно тогда флот стал океанским, ракетно-ядерным. Этот исторический период можно считать временем интенсивной разработки и освоения новых видов корабельного электрооборудования, не уступающего по

техническим характеристикам лучшим зарубежным образцам.

Были созданы синхронные генераторы различных серий, электродвигатели вспомогательных механизмов, аккумуляторные батареи для подводных лодок (ПЛ), вращающиеся преобразователи со сниженной вибрацией, статические преобразователи (выпрямители, инверторы, преобразователи частоты и комплексы преобразователей гарантированного питания), автоматические выключатели, дифференциальная токовая защита, быстродействующие переключатели. Разработаны кабели различного назначения, в том числе и герметизированные для ПЛ.

Разрабатывалось не только отдельное электрооборудование, но и типоряды различной мощности, в частности генераторы серий ТМВ и ГМ, двигатели для приводов вспомогательных механизмов серий ДМШ, автоматические выключатели.

В этот исторический период была создана полная номенклатура электротехнического оборудования, позволяющая создавать электроэнергетические системы (ЭЭС) кораблей различных классов. На момент создания корабельное электрооборудование соответствовало мировому уровню и в нем были реализованы последние достижения науки и техники, что подтверждает правильность проводимой ранее технической политики в области корабельной электротехники.



Таким образом, в корабельной электро-технике до настоящего времени используется ранее созданный задел, что позволяет поддерживать техническую готовность кораблей и обеспечивать создание новых.

Однако необходимо признать, что сегодня даже на новые корабли устанавливают отдельное электротехническое оборудование: пускатели, переключатели, розетки, светильники, соединители, оборудование в «мелкогерметичном» исполнении, несоответствующее современным требованиям, морально устаревшее, с полным отсутствием дизайна и значительными массогабаритными характеристиками.

Значительная часть номенклатуры корабельного электрооборудования также создана от 30 до 40 лет назад и имеет неудовлетворительные энергетические, массогабаритные, а также виброшумовые характеристики.

Существенно не изменились и нормативно-технические требования в области корабельной электротехники и технологии электромонтажных работ (ЭМР).

Следует отметить и ряд проблем, связанных с импортозамещением. Например, на территории Украины остались предприятия, производящие:

- статические преобразователи типа АПК-370 ПАО Запорожский завод «Преобразователь»;
- газовые турбины ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» (г. Николаев);
- двигатели серии ДМШ, пускатели, автоматические выключатели 37 серии, заводы ГП «Харьковский электромеханический завод», ПУАО «Харьковский электротехнический завод «Укрэлектромаш», ПАО «Электромашина» (г. Харьков).

При этом существует целый ряд положительных примеров, в рамках решения задач импортозамещения.

В том числе, силами ЗАО «Уралэлектромаш» (г. Каменск-Уральский) осваивается выпуск электродвигателей вспомогательных механизмов серии ДМШ с повышенными ВШХ. На предприятии также начато освоение производства индукторных электродвигателей.

ООО «Азовская кабельная компания» (г. Бердянск, Украина) выпускало около 70 % судового кабеля, в том числе весь герметизированный кабель для ПЛ, типа СМПВГ и КВДН. Сегодня для обеспечения строительства современных ПЛ осваивается производство герметизированного кабеля в ОАО «Эспокабель» (г. Подольск) и АО «Электрокабель» Кольчугинский завод»).

Особенно остро стоит вопрос с освоением выпуска выключателей взамен 37 серии. Работы в рамках импортозамещения в настоящее время проводятся ЗАО «Чебоксарский электроаппаратный завод», ОАО «ВНИИР-Прогресс» (г.Чебоксары), АО «Новая Эра» (г.Санкт-Петербург) и другими предприятиями.

Несомненно, уже давно пришло время проанализировать существующие требования к корабельному электрооборудованию, которые

необоснованно завышены, и выполнить их корректировку с точки зрения обеспечения разумной достаточности. Необходимо отметить, что даже вновь созданное электрооборудование быстро морально устаревает вследствие возросшей скорости технического прогресса, особенно в области автоматизации и IT-технологий.

Сегодня первоочередного решения требует задача оснащения кораблей современным электротехническим оборудованием. В тоже время количество российских предприятий промышленности, способных выпускать высокотехнологичное корабельное электрооборудование не увеличивается, а многим предприятиям требуется техническое перевооружение.

Вследствие этого сегодня даже на боевые корабли вынуждены устанавливать электрооборудование зарубежного производства.

## 2. Основные тенденции развития корабельной электротехники

При создании современных, как отечественных, так и зарубежных кораблей прослеживается тенденция повышения их энерговооруженности. В скором будущем разработать ЭЭС на существующем электрооборудовании, рассчитанном на напряжение 380 В, 50 Гц, будет невозможно, прежде всего, из-за вопросов токоограничения. Первоначально это коснется крупных надводных кораблей: авианосец, десантный корабль большого водоизмещения, эсминец типа «Лидер», а также кораблей и судов с системами электродвижения (СЭД), в дальней перспективе – атомных ПЛ. При этом выбор основных параметров ЭЭС (род тока, величина напряжения и частоты) во многом будет определяться составом потребителей электроэнергии.

Прогнозируемое увеличение энерговооруженности ЭЭС однозначно потребует создания высоковольтных сетей распределения. Повышение напряжения в первичных сетях до величины 6-10 кВ, с одной стороны приведет к снижению потребляемых токов исполнительными устройствами, сделает более компактными кабельные сети и позволит улучшить массогабаритные характеристики коммутационно-защитной аппаратуры. С другой стороны, потребуются разработка нового высоковольтного оборудования, для которого, с учетом условий эксплуатации, сложнее обеспечить требования электробезопасности. Кроме этого потребуются решить ряд вопросов, связанных с разработкой нормативных документов по эксплуатации высоковольтных сетей и допуску личного состава для их обслуживания [1].

Другая тенденция связана с тем, что в корабельной энергетике за последние годы прослеживается сдвиг в сторону увеличения потребления электроэнергии с пропульсивного комплекса, потреблявшего большую часть всей

электроэнергии корабля, на системы оружия и средства наблюдения и обнаружения.

За рубежом широко разрекламирована концепция создания «электрического корабля». Основу энергоустановки (ЭУ) таких кораблей составляют единые энергетические комплексы. Создание таких комплексов, обеспечивающих интеграцию всей ЭУ на основе электрической энергии, стало возможным в результате революционных преобразований в области твердотельной электроники большой мощности, системах автоматизации и управления.

В отечественном кораблестроении данные комплексы получили название единых электроэнергетических систем (ЕЭЭС). При этом вопрос терминологической однозначности и согласованности в области корабельной электроэнергетики в настоящее время требует актуализации на нормативном уровне [2].

Функционально ЕЭЭС представляет собой электроэнергетическую систему, объединённую с системой электродвижения, причем функционирование единой системы обеспечивается от одних и тех же источников электроэнергии.

Основная задача ЕЭЭС обеспечивать:

- электропитание комплексов ВиВТ;
- электропитание общекорабельных систем и механизмов;
- электродвижение корабля.

В качестве источников энергии для комплексов вооружения на новых физических принципах рассматривается применение накопителей и преобразователей электрической энергии, выполненных на основе конденсаторов сверхвысокой энергоёмкости, литий-ионных АБ и электрохимических генераторов.

Особенностью системы электропитания «электрического» корабля является использование в ЭУ только электрических средств энергообеспечения всех потребителей без использования механических, пневматических и гидравлических средств. Данный подход требует создания электрических приводов различного назначения, что позволит перевести все вспомогательные механизмы на электрический привод. При создании ЕЭЭС также потребуется переход на повышенное напряжение [3].

В настоящее время прослеживается тенденция широкого внедрения на кораблях и судах систем полного и вспомогательного электродвижения.

Наибольшее распространение электрический способ передачи энергии для вращения гребного винта нашел на судах, предназначенных для плавания в арктических и северных морях, а также буксирах. Применение электродвижения делает эти суда исключительно маневренными, а их ЕЭЭС способными воспринимать значительные нагрузки, связанные с частыми реверсами и взаимодействием гребного винта с ледяной крошкой и кромкой льда. Поэтому на большинстве ледоколов и судов ледового класса сегодня применяются системы полного электродвижения. Кроме этого они применяются

на судах вспомогательного флота: гидрографических, транспортных, спасательных и других судах.

Особенностью их ЕЭЭС является применение в первичной силовой сети напряжения 380 В, 50 Гц. Передача энергии к гребным электродвигателям и далее к винторулевым колонкам, осуществляется с помощью трансформаторов, повышающих напряжение в системе электродвижения до значений 690 или 960 вольт. Регулирование частоты вращения электродвигателя производится статическими преобразователями частоты. Суммарная мощность систем электродвижения таких заказов сегодня как правило не превышает 5 МВт.

На рис.1 представлены проекты судов вспомогательного флота с системами электродвижения, созданными филиалом «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (ФГУП «КГНЦ»).



Рис. 1 Проекты судов вспомогательного флота с СЭД

Необходимо отметить, что частично проблема повышения мощности систем электродвижения до 6-7 МВт решается применением электростанций с напряжением 690 В. При этом применение во входном звене статических преобразователей частоты управляемых выпрямителей позволяет отказаться от использования силовых трансформаторов. В настоящее время построено несколько судов вспомогательного флота с СЭД, оснащенных электростанциями напряжением 690 В. На рис.2 представлена типовая структура системы электродвижения данного типа судов.

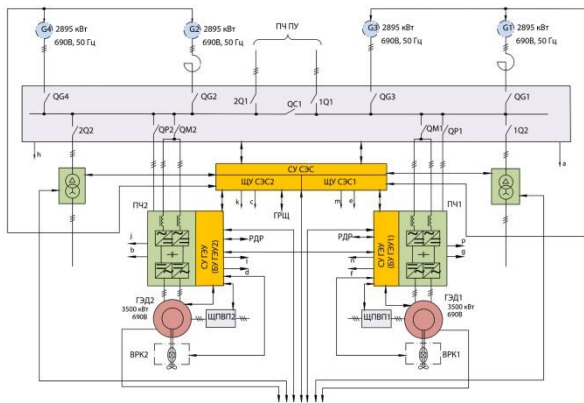


Рис. 2 Типовая структура СЭД судов, оснащенных электростанциями напряжением 690 В

В соответствии с концепцией развития ВМФ РФ, потребовалось проработать возможность внедрения на кораблях различных классов унифицированных энергетических установок на основе модульных единых электроэнергетических систем с системами электродвижения большой мощности (до 75 МВт).

В настоящее время разработаны аванпроекты ЭУ на основе модульных ЕЭЭС и определен состав основного оборудования СЭД. Наиболее перспективным было признано внедрение системы полного электродвижения на эсминце водоизмещением не менее 8 тыс.т.

При этом необходимо отметить, что широкому внедрению систем электродвижения препятствуют неудовлетворительные массогабаритные характеристики основного оборудования, в частности крупных электрических машин [4] и преобразовательной техники. Одним из перспективных направлений развития систем электродвижения большой мощности является создание и применение сверхпроводникового электрооборудования.

В то же время внедрение систем электродвижения обострило проблему обеспечения электромагнитной совместимости электрооборудования создаваемых кораблей, стойкости оборудования к импульсным коммутационным перенапряжениям.

### 3. Результаты наиболее значимых работ по созданию современного высокотехнологичного корабельного электрооборудования

В области кабельной продукции, для сохранения своих позиций на рынке судостроения, ведущими предприятиями отечественной промышленности в инициативном порядке разработаны судовые безгалогенные и огнестойкие кабели нового поколения. Данные кабели по техническим характеристикам приближаются к лучшим зарубежным образцам [5].

С точки зрения унификации у различных производителей они существенно отличаются по размерам, материалам, что существенно

затрудняет применение как существующей технологической документации по монтажу, так и унифицированных изделий, обеспечивающих электромонтаж: кабельных коробок, наконечников, средств уплотнения, сальников и другого оборудования.

Анализ их внедрения показал, что наиболее узким местом является проведение непосредственно электромонтажных работ на кораблях, особенно у кабелей, технология создания которых предусматривает повышенную изгибную жесткость оболочки, требует механических усилий при затяжке кабеля в трассу, что приводит к образованию трещин при изгибах в процессе электромонтажа. Данное обстоятельство зачастую обуславливается отсутствием разработок в части соответствующей технологической документации по электромонтажу.

Ранее всю технологическую документацию для кабелей разрабатывал ЦНИИ СЭТ. К настоящему времени разработано более 200 технологических инструкций определяющих технологию электромонтажных работ на кораблях. Эта отраслевая технологическая документация используется ЦКБ - проектанты кораблей при проектировании, а также электромонтажными предприятиями, выполняющими непосредственный монтаж кабелей на судовой поверхности. Инструкциями определяется порядок формирования кабельных трасс, способы прокладки, крепления, уплотнения, проходов через переборки различного назначения и прочный корпус, монтаж и многое другое. Отдельно разрабатывается документация, связанная с ремонтом, в частности технология сращивания кабелей.

Порядок работ, при их внедрении, следующий: разработка технологии – отработка ее на созданных образцах – проведение испытаний – выпуск технологической документации. К сожалению, в настоящее время данный порядок нарушен и не соблюдается.

Для внедрения отечественных безгалогенных и огнестойких кабелей на современные корабли Военно-Морского флота необходимо:

- разработать требования, которые ввели бы обязательную норму по применению на кораблях ВМФ кабельной продукции, отвечающей всем требованиям пожарной безопасности;
- создать полную номенклатуру электрических кабелей, имеющих одинаковые характеристики по сроку службы, температуре на жиле, требованиям технологии монтажа, показателям негорючести, по нераспространению горения, а также отвечающих существующим требованиям по одорометрии и санхимии;
- разработать новую технологическую документацию по проведению электромонтажных работ на заводах-строителях.

В настоящее время достаточно активно ведутся работы по разработке оборудования для систем электродвижения.

Для многоцелевых ПЛ филиалом «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «КГНЦ» и заводом «Электросила» (Санкт-Петербург) разработана малошумная вспомогательная система электродвижения, основу которой составляет частотно-регулируемый асинхронный электродвигатель.

Для применения на неатомных подводных лодках (НАПЛ) перспективны синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов. Работы по созданию комплекса системы электродвижения с использованием электродвигателя с возбуждением постоянными магнитами выполнялись для головного заказа одного из проектов НАПЛ силами ФГУП «НИИЭФА им. Д.В.Ефремова», для серийных заказов работы выполняет «Электросила». Целью работы являлось повышение скрытности НАПЛ, за счет снижения ее водоизмещения путем создания всережимного гребного электродвигателя с улучшенными массогабаритными и виброшумовыми характеристиками.

В 2013 году в состав вспомогательного флота вошел морской буксир проекта 745МБС, для которого впервые был создан вентильно-индукторный гребной электродвигатель мощностью 2 МВт для применения в составе системы электродвижения. Основными преимуществами реактивных электрических машин являются высокая надежность, простота конструкции и технологичность изготовления [6]. За период эксплуатации буксира данный двигатель успешно подтвердил свои высокие эксплуатационно-технические характеристики, что позволяет сделать вывод о перспективности его дальнейшего применения в судовых СЭД.

В настоящее время активно ведутся работы по созданию воздухонезависимых энергетических установок на базе электрохимических генераторов являющихся наиболее предпочтительными для НАПЛ и имеющих самые широкие перспективы применения [7].

В частности, в филиале «ЦНИИ СЭТ» разрабатываются технологии производства топливных элементов и батарей на их основе (рис.3), а также создаются энергетические установки в целом на базе электрохимических генераторов. Интенсивно развивается направление по созданию систем получения водорода, в том числе путем риформинга углеводородного топлива посредством паровой конверсии в условиях заказа. Разработки в этом направлении нацелены на повышение автономности неатомных ПЛ [8].



Рис. 3 Опытный образец батареи топливных элементов мощностью 50 кВт

С целью замены применяемых на ПЛ обратимых преобразователей, выполненных на базе вращающихся электрических машин, в «ЦНИИ СЭТ» завершаются работы по созданию статического обратимого преобразователя в модульном исполнении с повышенными требованиями по виброакустике. Данный преобразователь не имеет зарубежных аналогов и на его базе в дальнейшем можно развернуть создание целой линейки статических преобразователей различного назначения.

Как недостаток при создании преобразовательной техники можно отметить высокую зависимость от импортных комплектующих изделий. В настоящее время рассматривается возможность перехода на отечественную элементную базу, что в перспективе возможно, при этом наибольшую сложность представляют датчики и силовые полупроводниковые фазные модули.

Работы, проводимые в рамках ФЦП «Развитие гражданской морской техники» позволили разработать опытные образцы различного электрооборудования: генераторы, преобразователи, двигатели, автоматические выключатели для систем электродвижения большой мощности.

Полученный научно-технический задел, в том числе позволил обеспечить создание систем электродвижения мощностью 60 МВт для универсальных атомных ледоколов пр. 22220 (рис.4). В дальнейшем сформированный задел целесообразно использовать при создании высоковольтных сетей как судов, так и боевых кораблей.

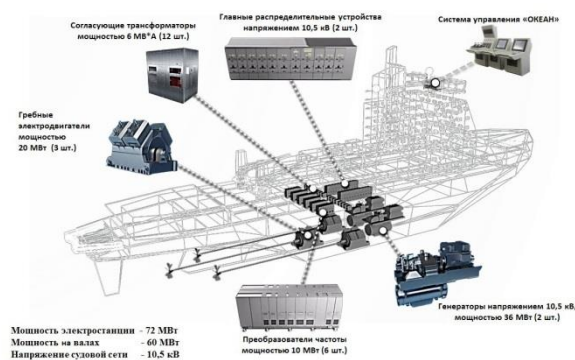


Рис. 4 Состав оборудования СЭД ледокола проекта 22220

Для технически и структурно сложных корабельных электротехнических комплексов, до установки непосредственно на заказе, крайне важно проведение предварительных комплексных испытаний.

С целью обеспечения проведения подобных испытаний систем электродвижения требуется создание специализированных береговых стенов.



На территории ФГУП «Крыловский государственный научный центр» в рамках ФЦП «Развитие гражданской морской техники» создан береговой стенд, позволяющий проводить испытания систем электродвижения и электротехнического оборудования мощностью до 40 МВт, при этом возможна его доработка до требований ВМФ (рис.5). В настоящее время на стенде планируется проведение комплексных испытаний СЭД ледокола проекта 22220.



Рис. 5 Электротехнический стенд мощностью до 40 МВт

#### 4. Отраслевые вопросы организационного характера по созданию современного высокотехнологичного корабельного электрооборудования

Ранее «ЦНИИ СЭТ» выполнял функции головного предприятия по судовой электротехнике и технологии. Реформирование судостроительной промышленности привело к тому, что в настоящее время в отрасли нет, предприятий, выполняющих подобные функции. В частности, результатом такого положения стало то, что в течение длительного времени не корректировался целый ряд нормативно-методических и технологических документов на судовые электромонтажные, регулировочно-сдаточные, ремонтные и производственные работы в области корабельной электротехники.

В настоящее время на уровне Минпромторга РФ принято решение о создании на базе филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр» Центра компетенций для выполнения базовых функций в области корабельной электротехники и технологии электромонтажных работ.

Для возобновления выполнения в новых экономических условиях базовых функций «ЦНИИ СЭТ», в первую очередь, должны быть решены вопросы организационно-технического взаимодействия с другими предприятиями судостроительной и электротехнической отраслей, а также с генеральными конструкторами и главными технологами по специализации.



Рис. 6 Модель корабля проекта 23550

#### Заключение

Таким образом, из проведенного анализа можно выявить основные тенденции развития корабельной электроэнергетики:

1. Прогнозируемое увеличение энергооборуженности ЭЭС в ближайшей перспективе потребует создания высоковольтных сетей распределения, для которых потребуется разработка нового высоковольтного электрооборудования. При этом необходимо решить ряд вопросов связанных с разработкой документов по эксплуатации высоковольтных сетей и допуску личного состава для их обслуживания.

В интересах ВМФ уже разрабатываются корабли с применением в первичной силовой сети напряжения 6,3 кВ. Начинается строительство патрульного корабля для Арктики пр. 23550 с высоковольтной ЭЭС (рис.6).

2. Сегодня в составе вспомогательного флота ВМФ находится более 20 судов с единой ЭЭС. Особенностью таких систем сегодня является применение в первичной силовой сети напряжения 380 В, частотой 50 Гц. Мощность систем электродвижения ограничена 5 МВт. При необходимости увеличения мощности системы электродвижения, также потребуется переход на повышенное напряжение.

3. При разработке высоковольтного электрооборудования особое внимание необходимо уделить вопросам электромагнитной совместимости и стойкости к импульсным коммутационным перенапряжениям.

4. Вместе с тем, внедрять системы электродвижения на все корабли, начиная с корвета и заканчивая авианосцем, не только не всегда возможно, в частности из-за массогабаритных характеристик, но и нецелесообразно как с технической, так и с экономической точки зрения. Применение СЭД – не цель, а лишь средство достижения цели, которая, в свою очередь, определяется через конкретные характеристики кораблей. Соответственно целесообразность внедрения СЭД должна рассматриваться применительно к конкретному кораблю с учетом решаемых им функциональных задач, установленных на нем



комплексов вооружений и особенностей эксплуатации.

Полноценное решение перспективных задач корабельной электротехники, на взгляд авторов, возможно лишь при выполнении ряда мероприятий.

Требуется создать отдельную подпрограмму «Корабельная электротехника», охватывающую создание всего комплекса электротехнических изделий и материалов в обеспечение строительства перспективных кораблей, включая:

- создание электрооборудования высокого напряжения для комплектации систем электродвижения и единых электроэнергетических систем в целом;

- создание силовых полупроводниковых приборов, не уступающих по характеристикам и надежности зарубежным аналогам;

- создание электротехнического оборудования с улучшенными виброшумовыми и массогабаритными характеристиками;

- создание новых высоковольтных корабельных кабелей и электротехнических изоляционных материалов;

- проведение исследований по определению оптимальных структур ЕЭЭС и систем электродвижения;

- актуализацию (разработку) нормативно-технической документации, обеспечивающей проектирование электротехнической части корабля и выполнение электромонтажных работ.

Обеспечить работу Центра компетенций по выполнению базовых функций в области корабельной электротехники и технологии электромонтажных работ.

Рекомендовать испытания нового высоковольтного электрооборудования и систем проводить на специализированных береговых стендах, а не на заказах. Для этого возможно использование стенда ФГУП «КГНЦ» мощностью 40 МВт при его доработке до требований ВМФ.

#### Литература

1. Губанов Ю.А., Ляпидов К.С., Турусов С.Н. Современный флот: от единых электроэнергетических систем к электрическому кораблю. // Морской вестник. – 2013. – спец. вып. №2(11) – С. 9–12.
2. Калинин И.М., Балабанов Б.А. Судовые электротехнические комплексы. Термины и определения. // Морской вестник. – 2013. – спец. вып. №2(11) – С. 26–30.
3. Иванов В.Г., Ляпидов К.С., Недзельский В.Е., Турусов С.Н. Создание «электрического» корабля – основное направление развития корабельной энергетики. // Судостроение. – 2013. – №5 – С. 13–20.
4. Лебедев В.М., Ясаков Г.С. Перспективы внедрения систем электродвижения на кораблях ВМФ. // Морской вестник. – 2013. – спец. вып. №2(11) – С. 47–49.
5. Ермолин Ю.Г., Ляпидов К.С. О применении современных безгалогенных огнестойких кабелей. // Судовое оборудование. – 2015. – №1 – С. 45–50.
6. В.Ф. Самосейко, Ф.А. Гельвер, Хомяк В.А., Лазаревский Н.А. Реактивные электрические машины с зубчатым ротором и статором. Методика проектирования. Алгоритмы управления. Санкт-Петербург: Изд. ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2016. 196 с.
7. Никитин В.С., Половинкин В.Н., Барановский В.В. Современное состояние и перспективы развития отечественных корабельных дизельных энергетических установок. // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2017. – №2(380) – С. 70–91.
8. Аваков В.Б., Хайров Д.А., Ландграф И.К., Живулько С.А., Соколов А.А. Разработка моноблочного конвертера углеводородного топлива с отбором водорода из зоны реакции. // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2017. – №2(380) – С. 111–119.

#### References:

1. Y.A. Gubanov., K.S. Lyapidov, S.N.Turusov "Modern Fleet: From Integrated Electric Power Systems to an "Electric" Ship." Morskoy Vestnik, 2013, Special №2 (11), pp. 9-12.
2. I.M. Kalinin, B.A. Balabanov "Ship Electrotechnical Facilities. Terms and Definitions." Morskoy Vestnik, 2013, Special №2 (11), pp. 26-30.
3. V.G. Ivanov, K.S. Lyapidov, V.Y. Nedzelsky, S.N. Turusov "The Creation of an "Electric" Ship is the Main Course of Development of Ship Power Engineering." Sudovoye Oborudovanie, 2013, № 5, pp. 13-20.
4. V.M. Lebedev, G.S. Yasakov. "Prospects for implementation of electric propulsion systems for naval ships". Morskoy Vestnik, 2013, Special №2 (11), pp. 47–49.
5. Y.G.Yermolin, K.S. Lyapidov "On the Use of Modern Halogen-Free Fire Resistant Cables." Sudovoye Oborudovanie, 2015, No. 1, pp. 45-50.
6. V.F. Samoseyko, F.A. Gelver, V.A. Homyak, N.A. Lazarevsky. "Reluctance motors with gear-type rotor and stator. Methodics of the design. Algorithms of control". St.Petersburg, Krylov state research centre, 2016. 196 p.
7. V.S. Nikitin, V.N. Polovinkin, V.V.Baranovsky. Current status and future development prospects of Russian marine diesel power plants. Transactions of the Krylov state research centre. 2017. №2(380) – pp. 70–91.
8. V.B. Avakov, D.A. Khairov, I.K.Landgraf, S.A.Zhivulko, A.A.Sokolov. "Development of the monoblock converter for the hydrocarbon fuel with hydrogen extraction from the reaction zone". Transactions of the Krylov state research centre. 2017. №2(380),– pp. 111–119.

**ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА**

УДК 539.4: 539.1.043

**МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ  
МЕХАНИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ  
ИЗЛУЧЕНИЙ НА ТОНКОСТЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ****Афанасий Викторович Острик**

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник  
Институт проблем химической физики РАН  
142432, Черноголовка, пр. акад. Семенова, 1  
e-mail: ostrik@icp.ac.ru

**Владимир Яковлевич Терновой**

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией  
Институт проблем химической физики РАН  
142432, Черноголовка, пр. акад. Семенова, 1  
e-mail: ternovoi@icp.ac.ru

**Дмитрий Николаевич Николаев**

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник  
Институт проблем химической физики РАН  
142432, Черноголовка, пр. акад. Семенова, 1  
e-mail: nik@icp.ac.ru

**Аннотация**

Рассматриваются логика испытаний и минимальный набор газодинамических устройств для исследования прочности конструкций летательных аппаратов при механическом действии импульсных потоков излучений. Испытания предлагается проводить в два этапа. На первом этапе исследовать на фрагментах волновые процессы и вызываемые ими разрушения при действии импульсных нагрузок. На втором этапе провести завершающие испытания всей конструкции в условиях ее функционирования при воздействии динамических нагрузок, приводящих к оболочечной стадии деформирования.

Для генерации импульсных нагрузок применяются контактный секторный и контактный светодетонирующий заряды. Динамические нагрузки создаются эквидистантно или объемно распределенными зарядами. Для испытаний на прочность к последовательности динамических нагружений (в том числе, и в резонансных режимах) удобно использовать многоствольную ударную трубу взрывного действия.

Кратко описываются результаты испытаний. Показано, что в настоящее время имеется работоспособный набор устройств для моделирования механического действия излучений на конструкции летательных аппаратов совместно с полетными условиями.

**Ключевые слова:** потоки излучений; механическое действие; летательные аппараты; тонкостенные конструкции; газодинамические устройства.

**METHODS OF THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF  
MECHANICAL ACTION FROM PULSE FLUXES OF RADIATIONS  
ON THIN-WALLED CONSTRUCTIONS****Afanasy V. Ostrik**

Doctor of Engineering, professor, chief researcher  
Institute of problems of chemical physics RAS  
142432, Chernogolovka, ave. of the academician Semyonov, 1  
e-mail: ostrik@icp.ac.ru

**Vladimir Ya. Ternovoi**

doctor of physical and mathematical sciences, head of the laboratory  
Institute of problems of chemical physics RAS  
142432, Chernogolovka, ave. of the academician Semyonov, 1  
e-mail: ternovoi@icp.ac.ru

**Dmitry N. Nikolaev**

candidate of physical and mathematical sciences, senior research associate  
Institute of problems of chemical physics RAS  
142432, Chernogolovka, ave. of the academician Semyonov, 1  
e-mail: nik@icp.ac.ru

### Abstract

The logic of tests and a minimal set of gasdynamic devices for a research of strength of flight vehicle constructions taking into account the mechanical action of radiations are considered. It is offered to carry out tests in two steps. The wave processes and destructions caused by action of pulse loadings are investigated on the first step. Researchers are admissible to be done on fragments of construction. The finishing tests of all construction in flight conditions and at action of the dynamic loadings are carried out on the second step. This step corresponds to a deformation stage as a shell.

The contact sector charge and contact charge detonating from irradiation are applied for modeling of pulse loadings. Dynamic loadings are generated by means of the charges which are volume distributed or located on an equidistant surface. It is convenient to use a multibarrelled shock pipe of explosive action for strength tests to the set of dynamic loadings. This gasdynamic device allows to realize the resonant regimes of loadings.

Results of tests are briefly described. It is shown that now an efficient set of devices for modeling of mechanical action of radiations on flight vehicles together with flight conditions is available.

**Key words:** fluxes of radiations; mechanical action; flight vehicles: thin-walled constructions; gasdynamic devices

### Введение

Экспериментальные исследования последствий механического действия импульсных потоков излучений (ИПИ) на элементы конструкций летательных аппаратов (ЛА) путём их непосредственного облучения не представляются возможными в связи с отсутствием мощных лабораторных источников излучения, способных генерировать необходимые плотности энергии на поверхностях с размерами порядка нескольких метров [1-3]. В большинстве случаев не удаётся получить достаточно надёжных результатов и методами моделирования, поскольку требования совпадения параметров подобия для модели и натурной конструкции практически сводятся к идентичности последних по абсолютным размерам и свойствам материалов. Так, например, если заряд топлива геометрически подобной модели твердотопливного реактивного двигателя ЛА имеет характерные размеры, не превышающие критического размера детонации, то при моделировании воспроизвести детонацию, вызванную воздействием механического импульса, вообще невозможно, хотя для натурального двигателя она может иметь место. Аналогичные трудности возникают и при попытке моделирования нестационарных разрушений тонкостенных композитных корпусов ЛА. Условие равенства относительных толщин  $h/R$  ( $h$ ,  $R$  – толщина и радиус кривизны оболочки) корпуса и его модели при неизменной толщине армирующей нити приводит к уменьшению числа слоёв армирования у модели, что в свою очередь искажает характер и последовательность разрушения этих слоёв. Поэтому основным методом исследования последствий механического действия излучений (МДИ) в настоящее время являются испытания натуральных конструкций ЛА при их нагружении устройствами воспроизведения механического действия излучений [1, 4–7].

#### 1. Логика проведения испытаний

Необходимость в оценке прочности элементов ЛА возникает задолго до её создания на этапе

конструирования и выбора наиболее оптимальных конструктивных решений. Однако поскольку широко применяемые в ЛА композитные материалы не существуют отдельно от конструкции, а создаются одновременно в одном и том же технологическом процессе, то, вообще говоря, экспериментальное исследование на прочность возможно лишь после изготовления изделия. Тем не менее, оказывается предпочтительным проводить исследования на фрагментах и только на конечном этапе осуществить несколько завершающих испытаний всей конструкции в целом. Это обусловлено, во-первых, существенно большей стоимостью композитного изделия по сравнению с его фрагментами (как правило, из одной композитной конструкции можно фрагментировать множество однотипных элементов, например, из обломок высококачественного давления, изготовленных методом нитяной намотки), во-вторых, возможностью изготовления фрагментов по ряду прочностных характеристик, близких к элементам конструкции (без создания последних) и, в-третьих, отсутствием устройств генерации малоимпульсных нагрузок микросекундной длительности на достаточно больших поверхностях с характерными размерами натуральных конструкций.

Как известно, по характеру своего воздействия и причинам, вызывающим разрушение тонкостенных конструкций, нестационарные нагрузки условно делятся на импульсные и динамические. Условия динамического нагружения реализуются в случае длительностей воздействия, сравнимых с периодом свободных колебаний тонкостенных элементов конструкции ЛА (например, корпусов) и, по крайней мере, в 10...15 раз больших времени распространения возмущения по толщине (это условие обеспечивает преобладание оболочечной стадии деформирования). Разрушение тонкостенных композитных конструкций ЛА при динамическом деформировании наступает из-за развития недопустимых прогибов, образования расслоений и трещин.

В случае импульсного нагружения, когда длительность воздействия не только не превышает четверти периода колебаний, но и сравнима или меньше времени распространения возмущения по толщине элемента конструкции, основной причиной разрушения является развитие волновых процессов, сопровождающееся образованием расслоений (в композитном материале) и отколов. Однако и при таком импульсном нагружении тонкостенных конструкций по мере затухания волн напряжений и роста их пространственной протяженности до размеров, соизмеримых с толщиной, процесс деформирования переходит в оболочечную стадию. Более того, применение защитных пористых покрытий, существенно снижая роль волновых процессов в разрушении материала, практически не защищает от образования трещин и развития недопустимых прогибов. Поэтому завершающие испытания конструкции в целом на прочность к динамическим нагрузкам, вызывающим оболочечную стадию деформирования, оказываются полезными и в том случае, когда по условиям эксплуатации предполагается воздействие только импульсно-волнового характера. В то же время для исследования последствий импульсных

нагружений натурных испытаний не требуется, поскольку особенностью таких воздействий, приводящих к волновым разрушениям, является их локальность, заключающаяся в том, что, как правило, удастся выделить из конструкции фрагмент и поставить его в такие условия, при которых разрушения фрагмента и соответствующей части конструкции подобны и происходят при близких параметрах нагрузок.

Таким образом, исследование на прочность тонкостенных конструкций к МДИ предлагается проводить в два этапа [5, 7, 8] (см. рис.1). На первом этапе осуществить детальное исследование волновых процессов и вызываемых ими разрушений при действии импульсных нагрузок на фрагменты. В случае получения недопустимых (существенно влияющих на прочность или не удовлетворяющих техническим требованиям) уровней повреждений модернизировать конструкцию, обеспечив ее защиту дополнительными демпфирующими слоями. Затем подтвердить действенность защиты в заключительных испытаниях модернизированных фрагментов.

На втором этапе провести завершающие испытания всей конструкции с защитными слоями (если они необходимы в соответствии с результатами первого этапа) в условиях ее функционирования при воздействии динамических нагрузок, приводящих к оболочечной стадии деформирования, которая развивается после затухания волновых процессов. Проведение второго этапа испытаний связано с необходимостью моделирования полётных условий совместно с воспроизведением МДИ и требует разработки соответствующих устройств.

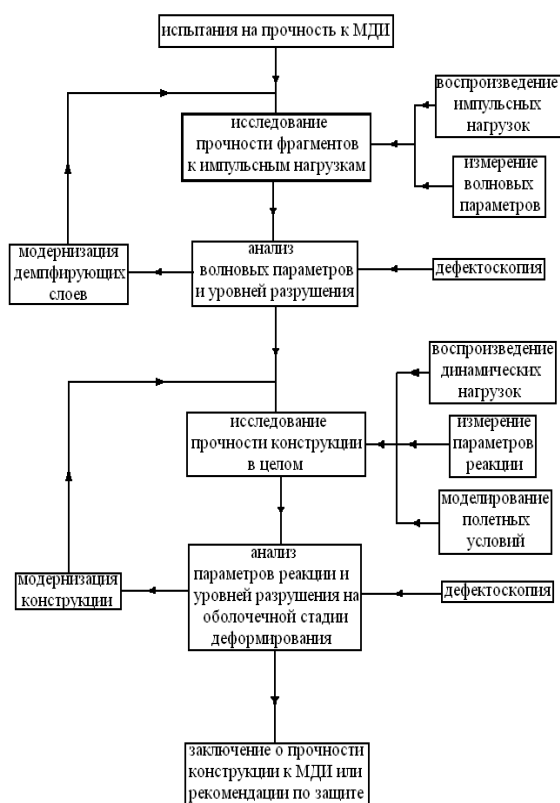


Рис. 1. Схема проведения испытаний

## 2. Газодинамические устройства

Удобным методом создания нестационарных нагрузок является газодинамический [1, 3, 4-6]. В этом методе нагружение конструкции осуществляется посредством детонации заряда взрывчатого вещества (ВВ) специально спроектированной и экспериментально подобранной формы, обеспечивающей требуемые пространственно-временные характеристики нагрузки. Энергетические параметры ВВ позволяют изменять амплитуды и длительности нагрузок в широких пределах и независимым образом. Помимо задания формы зарядного устройства изменение параметров нагрузки осуществляется надлежащим распределением пространственной плотности ВВ, способами и временной последовательностью его детонирования, а также подбором характеристик прокладки между испытываемой конструкцией и зарядом. Возможности газодинамического метода оказываются достаточными для разработки на его основе набора устройств, воспроизводящих МДИ импульсов излучений в широком диапазоне длин волн и плотностей потоков [2, 3]. Достоинствами газодинамического

метода моделирования являются: возможность испытания относительно крупногабаритных элементов конструкций (линейные размеры порядка метра и более); широта диапазона варьирования пространственно-временным профилем импульса давления на нагружаемой поверхности; техническая простота реализации в полигонных условиях.

Важным предварительным этапом разработки устройств является формулировка требований к параметрам нестационарных нагрузок, воспроизводимых на поверхностях конструкций ЛА.

В зависимости от длины волны (энергии квантов) меняется механизм поглощения излучения в конденсированном веществе и парах преграды.

Кроме длины волны физика взаимодействия во многом определяется длительностью воздействующего импульса излучения. Различным диапазонам длин волн могут быть сопоставлены наиболее мощные источники излучений с характерными длительностями генерации. В свою очередь, при фиксированных длинах волн и длительностях импульса поверхностные плотности энергии или плотности потока излучения могут быть уже выбраны из

условия достижения возникающими нестационарными нагрузками уровней, необходимых для повреждения элементов конструкции ЛА. Перечисленные параметры ИПИ (длина волны, длительность и плотность потока) вместе со свойствами материала преграды и окружающей её среды, как правило, в первом приближении, оказываются достаточными для определения режима взаимодействия излучения с веществом.

Проведенный анализ результатов расчетов параметров МДИ при различных диапазонах изменения энергий квантов, поверхностных плотностей энергий, свойств материалов преграды и окружающей ее воздушной среды позволяет сформулировать требования к характеристикам нестационарных нагрузок, которые необходимо воспроизводить [1, 3]. Эти требования представлены в таблице 1 (ВС – воздушная среда). Из таблицы следует, что требуется воспроизводить нагрузки с параметрами  $t_n = 0,01 \dots 300 \text{ мкс}$  и  $I_p = 0,02 \dots 5 \text{ кПа} \times \text{с}$ . Отметим, что рассмотрение более экзотических режимов воздействия ИПИ требует разработки устройств, генерирующих более сложные пространственно - временные распределения [1].

Таблица 1

Требования к устройствам, моделирующим МДИ

Тип излучения	Параметры излучения				Условия воздействия	Характеристики нагрузки		№ режима
	$\lambda$ , А	$\tau$ , мкс	$q$ , МВт /см <sup>2</sup>	$W$ , кДж/см <sup>2</sup>		$t_n$ , мкс	$I_p$ , кПа×с	
ВИ и ИКИ	$4 \times 10^3 \dots 10^5$	10...200	10...500	1...10	в воздухе	50...300	0,1...2	1
УФИ	$3 \times 10^3 \dots 10^4$	0,1...10	$10^2 \dots 10^4$	1...10	в вакууме	0,1...10	0,1...3	2
Ультрамягкое РИ	10...300	$10^{-4} \dots 10^{-2}$	$10^2 \dots 10^7$	1...10	в вакууме	0,01...1	0,1...5	3
	100...300	$10^{-5} \dots 10^{-2}$	$10^2 \dots 10^7$	0,1...1	после прохождения ВС	0,01...1	0,05...0,5	4
Мягкое РИ	0,6...10	0,01...0,1	$10^3 \dots 5 \times 10^5$	0,1...5	в вакууме	0,05...5	0,07...3	5
Жёсткое РИ	0,15...10	$5 \times 10^{-3} \dots 5 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^3 \dots 10^6$	0,1...5	в вакууме	0,5...5	0,1...5	6
	0,15...10	1...10	$10 \dots 10^3$	0,3...1	после прохождения ВС	1...10	0,02...1	7

ИКИ, ВИ, УФИ – инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое излучения; РИ – рентгеновское излучение

Рассмотрим конкретные устройства, реализующие газодинамический метод генерации импульсных нагрузок. Для воспроизведения МДИ наиболее часто используется контактный секторный заряд (КСЗ), создающий нагрузки микросекундной длительности. Заряд выполняется из листового ВВ, разбитого для исключения «ножевого эффекта» на небольшие участки – сектора. Каждый участок заряда инициируется в одной точке полосковой ВВ. Полоски одинаковой длины собираются с одной стороны в пучок и инициируются быстродействующим детонатором.

Многоточечное инициирование обеспечивает одновременность приложения воздействия.

Для генерации меньших длительностей нагрузки и получения низких импульсов давления был разработан контактный светодетонирующий заряд (КСДЗ) [1], представляющий собой инициируемое излучением плёночное покрытие светочувствительного ВВ.

Для создания динамических нагрузок на втором этапе испытаний натуральных конструкций на прочность к МДИ целесообразно и удобно использовать эквидистантно-поверхностный заряд (ЭПЗ) [1, 3], который представляет собой эластичное листовое ВВ, размещенное на инертной подложке, отнесенной на заданное расстояние от объекта и образующее эквидистантную поверхность к нагружаемому участку. Одновременность подрыва ВВ достигают



многоточечным инициированием от одного детонатора с помощью лент одинаковой длины из листового ВВ.

Для создания динамических нагрузок длительностью более 100мкс был разработан объемно-распределенный заряд (ОРЗ) [1, 3], изготавливаемый из полосок низкоэнергетического ВВ. Подрыв заряда осуществляется со стороны торца более близкого к нагружаемой поверхности. Для надежного инициирования 3-4 полоски собираются в пучок, в который вставляется электродетонатор..

Для воспроизведения последовательности динамических нагружений (в том числе, и в резонансных режимах) удобно использовать многоствольную ударную трубу взрывного действия (УТВД) [1, 3].

Параметры описанных выше устройств представлены в таблице 2. Видно, что набор устройств позволяет воспроизвести МДИ в различных диапазонах энергий квантов и плотностей потоков из таблицы 1.

Сравнение таблицы 2 с таблицей 1 показывает, что предлагаемый набор устройств обеспечивает необходимые параметры нагрузок для большинства практически важных случаев воздействия ИПИ. Однако, отсутствуют газодинамические устройства, генерирующих нагрузки малой длительности  $\tau_H < 0,2$  мкс.

Таблица 2

**Газодинамические устройства для воспроизведения МДИ**

Вид устройства	Возможности (характеристики)		Назначение (моделируемые режимы воздействия)	номера режимов воздействия из табл. 1
	$\tau_H$ , мкс	$I$ , кПа $\times$ с		
КСЗ	1...10	0,8...5	воздействие УФИ или РИ	2 <sup>#</sup> , 3 <sup>#</sup> , 5 <sup>#</sup> – 8 <sup>#</sup>
КСДЗ	0,2...1	0,05...2	воздействие РИ	3 <sup>#</sup> , 4 <sup>#</sup> , 5, 6, 7 <sup>#</sup>
ЭПЗ	10...200	0,3...3	воздействие ВИ или ИКИ в ВС	1 <sup>#</sup> , 2 – 7 (оболоч. стадия)
ОРЗ	100...500	0,1...2	воздействие ВИ или ИКИ в ВС	1
УТВД	50...200	0,5...2	импульсно-частотное воздействие ВИ или ИКИ в ВС	1 <sup>#</sup>

<sup>#</sup> – устройство моделирует этот режим лишь частично

### 3. Устройства, моделирующие полетные условия

В полете элементы конструкций ЛА находятся под действием траекторных нагрузок и нагреваются от аэродинамических и внутрикамерных тепловых потоков двигателя, а также при объемном поглощении излучений [2]. Устройства моделирующие полетные условия требуются и разрабатываются при создании новых ЛА. Их рассмотрение является отдельной и весьма сложной темой. Используемый набор устройств для моделирования полетных условий совместно с МДИ рассматриваются в работе [1].

### 4. Результаты испытаний

Изложенная выше логика испытаний и устройства использовались при испытаниях различных элементов конструкций на протяжении многих лет. Эти испытания подтвердили работоспособность этой логики и набора устройств. Отметим, что конечно все эти годы набор устройств и методов измерений параметров реакции совершенствовался.

Как уже отмечалось, первый этап испытаний допустимо проводить на фрагментах. Примером

первого этапа испытаний могут служить результаты исследований [5] для четырех видов защиты из многослойных пакетов. Экраны испытывались в качестве защиты фрагменты конструкций из органопластика и резины. Показана высокая эффективность этих защитных пакетов.

Испытания, соответствующие второму этапу, делались для представительного набора натуральных конструкций. Наибольший интерес представляют прочностные испытания работающих реактивных двигателей твердого топлива [4], находящих в условиях механического действия.

### Заключение

Таким образом, в настоящее время имеется набор газодинамических устройств и средств измерения параметров реакции для проведения экспериментальных исследований МДИ на тонкостенные конструкции ЛА. По-прежнему остается актуальной проблема разработка генераторов нестационарных нагрузок малой длительности ( $\tau_H \leq 0,2$  мкс).

### Благодарности

Работа выполнялась при частичной поддержке РФФИ (грант № 16-08-01065а).

### Литература

1. Бакулин В.Н., Грибанов В.М., Острик А.В., Ромадинова Е.А., Чепрунов А.А. Механическое действие рентгеновского излучения на тонкостенные композиционные конструкции. М.: ФМЛ, 2008. – 256 с.
2. Бакулин В.Н., Острик А.В. Комплексное действие излучений и частиц на тонкостенные конструкции с гетерогенными покрытиями. - М.: ФМЛ, 2015. – 288 с.
3. Лоборев В.М., Острик А.В., Петровский В.П. Чепрунов А.А. Методы моделирования механического действия излучений на материалы и конструкции. Сборник №1, С. Посад: ЦФТИ МО РФ, 1997. – 75 с.
4. Острик А.В., Петровский В.П. Огневые стендовые испытания на прочность твердотопливных ракетных двигателей к воздействию боковой кратковременной нагрузке //Хим. физика, 1995, №1, том. 14. С. 11–17.
5. Острик А.В., Петровский В.П. Экспериментальные методы исследования работоспособности конструкций из композиционных материалов в условиях воздействия нестационарных нагрузок //Конструкции из КМ, 1996, вып. 1. С. 3–9.
6. Острик А.В., Петровский В.П., Зайцев А.Д. Газодинамические устройства для генерации нестационарных нагрузок со сложным пространственно-временным профилем //Конструкции из КМ, 1996, вып. 3. С. 3-12.
7. Острик А.В., Бакулин В.Н., Чепрунов А.А. Экспериментальные методы исследования механического действия излучений на тонкостенные композитные корпуса конструкций //Проблемы прочности и пластичности. Н. Новгород: изд-во ННГУ, 2000. С. 117-121.
8. Острик А.В. Расчетно-экспериментальное прогнозирование последствий механического действия рентгеновского излучения на корпуса летательных аппаратов //Конструкции из КМ, 2002. Вып. 1. С. 41-55.

### References

1. Bakulin V.N., Gribanov V.M., Ostriak A.V., Romadinova E.A., Cheprunov A.A. Mekhanicheskoe deystvie rentgenovskogo izlucheniya na tonkostennye kompozitsionnye konstruksii. M.: FML, 2008. – 256 s.
2. Bakulin V.N., Ostriak A.V. Kompleksnoe deystvie izlucheny i chastits na tonkostennye konstruksii s geterogennymi pokryiyami. - M.: FML, 2015. – 288 s.
3. Loborev V.M., Ostriak A.V., Petrovskiy V.P. Cheprunov A.A. Metody modelirovaniya mekhanicheskogo deystviya izlucheny na materialy i konstruksii. Sbornik №1, S. Posad: TsFTI MO RF, 1997. – 75 s.
4. Ostriak A.V., Petrovskiy V.P. Ognevye stendovye ispytaniya na prochnost' tverdotoplivnykh raketnykh dvigateley k vozdeystviyu bokovoy kratkovremennoy nagruzke //Khim. fizika, 1995, №1, tom. 14. s. 11–17.
5. Ostriak A.V., Petrovskiy V.P. Eksperimental'nye metody issledovaniya rabotosposobnosti konst-ruktsiy iz kompozitsionnykh materialov v usloviyakh vozdeystviya nestatsionarnykh nagruzok //Konstruksii iz KМ, 1996, vyp. 1. .s. 3–9.
6. Ostriak A.V., Petrovskiy V.P., Zaytsev A.D. Gazodinamicheskie ustroystva dlya generatsii nestatsionar-nykh nagruzok so slozhnym prostranstvenno-vremennym profilem //Konstruksii iz KМ, 1996, vyp. 3. s. 3-12.
7. Ostriak A.V., Bakulin V.N., Cheprunov A.A. Eksperimental'nye metody issledovaniya mekhanicheskogo deystviya izlucheny na tonkostennye kompozitnye korpusa konstruksiy //Problemy prochnosti i plastichnosti. N. Novgorod: izd-vo NNGU, 2000. s. 117-121.
8. Ostriak A.V. Raschetno-eksperimental'noe prognozirovanie posledstviy mekhanicheskogo deystviya rentgenovskogo izlucheniya na korpusa letatel'nykh apparatov //Konstruksii iz KМ, 2002. Vyp. 1. s. 41-55.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ**

УДК 629.12

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ РУЛЯ В СОСТАВЕ КОМПОНОВКИ  
ВОДОМЕТНОГО ДВИЖИТЕЛЯ СУДНА С ВОЗДУШНОЙ КАВЕРНОЙ ПО  
РЕЗУЛЬТАТАМ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ****Иван Сергеевич Каймаков**

аспирант

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н. И. Лобачевского  
603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23  
e-mail: zvukizvuki@rambler.ru

**Михаил Сергеевич Крюков**

аспирант

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24  
e-mail: krukov\_ms@mail.ru

**Алла Александровна Николаева**

аспирант

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24  
e-mail: nikolaeva-aa.nn@yandex.ru

**Андрей Владимирович Февральских**

аспирант

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24  
e-mail: a.fevralskih@gmail.com

**Аннотация**

Исследуются компоновки движительно-рулевого комплекса (ДРК) судна с воздушной каверной (СВК) с двумя различными вариантами рулей: плоским и радиальным. С использованием технологий численного моделирования гидродинамики CFD (Computational Fluid Dynamics) определены коэффициенты гидродинамических сил, действующих на рули при обтекании струей водометного движителя на крейсерском режиме хода СВК. Возможности CFD-моделирования обтекания рулей СВК позволяют учитывать срывные явления при больших углах перекаладки, вращение струи, испускаемой движителем, а также её взаимодействие с внешним гидродинамическим потоком. Результаты CFD-моделирования демонстрируют более высокие значения коэффициентов боковой гидродинамической силы, действующей на радиальный руль, по сравнению с аналогичными коэффициентами для плоского руля при умеренных углах перекаладки. Коэффициенты сопротивления плоского и радиального рулей при этом отличаются незначительно. Результаты исследования могут быть использованы на ранних стадиях проектирования быстроходного СВК при формировании технического предложения по принципиальной компоновке движительно-рулевого комплекса.

**Ключевые слова:** судно с воздушной каверной, движительно-рулевой комплекс, вычислительная гидродинамика, CFD-технологии.

**INVESTIGATION OF RUDDER SHAPES IN THE COMPOSITION  
OF WATER JET PROPULSION UNIT AIR-CAVERN VESSEL BASED  
ON RESULTS OF CFD MODELING****Ivan S. Kaimakov**

post-graduate student

N.I.Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod – National Research University  
23 Gagarin Avenue Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation  
e-mail: zvukizvuki@rambler.ru

**Mikhail S. Kryukov**

post-graduate student

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
24, Minin St., Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation  
e-mail: krukov\_ms@mail.ru

**Alla A. Nikolaeva**

post-graduate student

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

24, Minin St., Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation

e-mail: nikolaeva-aa.nn@yandex.ru

**Andrey V. Fevralskikh**

post-graduate student

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

24, Minin St., Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation

e-mail: a.fevralskikh@gmail.com

### Abstract

The propulsion-steering complex configurations of air-cavern vessel with two variants of rudder blades – straight and radial – are analyzed. Using the Computational Fluid Dynamics (CFD) technologies the coefficients of the hydrodynamic forces acting on the rudders when flowing along the stream jet at the cruising speed were defined. The possibilities of CFD modeling, in contrast to the traditional approach to the calculation of rudders, allow to take into account the disruptive phenomena at large angles of the shift, the rotation of the jet emitted by the propulsor, as well as its interaction with the external hydrodynamic flow. The CFD modeling results show higher values of the side hydrodynamic force coefficients acting on the radial rudder blade, compared to similar coefficients for a straight rudder blade at moderate angles of the rudder displacement. At the same time the difference in the resistance coefficients between straight and radial rudder blade is not significant. The results of the research can be used in the early stages of high-speed air-cavern vessel designing in the formation of a technical proposal for the basic arrangement of the propulsion-steering complex.

**Key words:** air-cavern vessel, propulsion-steering complex, CFD, CFD-technologies.

### 1. Постановка задачи

В условиях внутренних водных бассейнов и рек, в регионах с недостаточно развитым сухопутным и воздушным транспортным сообщением эксплуатация пассажирских и грузовых судов с воздушной каверной (СВК) является одним из эффективных средств решения задач доставки пассажиров и грузов. СВК относятся к классу судов с динамическим принципом поддержания (СДПП), которые за счет высоких скоростных характеристик способны конкурировать с другими видами транспорта, в обеспечивающего возможность посадки/высадки пассажиров и груза на необорудованный берег, а также защищенность движительно-рулевого комплекса (ДРК). ДРК расположен, как правило, по бортам судна (рисунок 1) и состоит из водометного движителя (ВД) и рулевого устройства.

ВД приспособлен для работы вблизи поверхности воды, и его гидродинамические характеристики практически не изменяются при попадании воздуха в гидравлическое сечение. Стабильная работа ВД обеспечивается выбором гребного винта, способного держать нагрузку в постоянном контакте с атмосферным воздухом, в том числе в условиях волнения.

Конструктивно ВД состоит из водозаборника, на выходном сечении которого в кольцевой насадке расположен гребной винт с приводом от гребного вала (рисунок 1). Водозаборник, обводы которого выбираются при проектировании из условия максимальной подачи воды к гребному винту, представляет собой туннельное образование в корпусе.

том числе сухопутного и воздушного, в труднодоступных регионах. СВК особенно актуальны при эксплуатации в прибрежных морских и в мелководных районах, где затруднено обустройство причальных пунктов, а также на магистральных, боковых и малых реках, где для обеспечения традиционного водоизмещающего судоходства необходимо регулярное выполнение дноуглубительных работ.

Помимо высоких скоростных характеристик и малой осадки за счет воздушной каверны, достоинства компоновок СВК включают наличие носового аппарельного устройства,

Положение винта выбирается таким образом, что при любых допустимых условиях эксплуатации загрузка винта практически не меняется. Лопастей винта имеют клиновое сечение, на которых располагаются интерцепторы, позволяющие регулировать гидродинамические характеристики.



Рисунок 1 – Движитель СВК: 1 – водозаборник, 2 – кольцевая насадка винта, 3 – гребной винт, 4 – гребной вал

Рулевое устройство состоит из плоского подвесного балансирного руля, находящегося в струе винта, сдвинутого от оси винта в направлении диаметральной плоскости (ДП) судна [1].

Одной из основных проблем эксплуатации СВК (характерной и для других видов СДПП) является низкие характеристики маневренности на скоростных крейсерских режимах и при движении в условиях узкого фарватера вблизи остановочных пунктов. Эти ограничения побуждают к поиску и исследованию возможностей применения новых компоновочных решений при проектировании ДРК.

Развитие проектов быстроходных судов многим обязано результатам модельных испытаний. В то же время существуют методы численного моделирования гидродинамики, в том

числе, методы CFD-моделирования (CFD-computational fluid dynamics, вычислительная динамика жидкости), позволяющие получать достоверную проектную информацию. Использование методов CFD-моделирования в ряде случаев является более экономным по затратам средств и времени [2], чем подготовка и проведение испытаний моделей.

Целью настоящей работы является исследование гидродинамики вариантов ДРК с различными рулями – плоским и радиальным, показанными на рисунке 2. Задачи работы включают оценку возможностей различных подходов к определению характеристик рулей с использованием CFD-моделирования, выполнение расчетов по моделированию гидродинамики компоновочных вариантов ДРК и сравнительный анализ результатов.

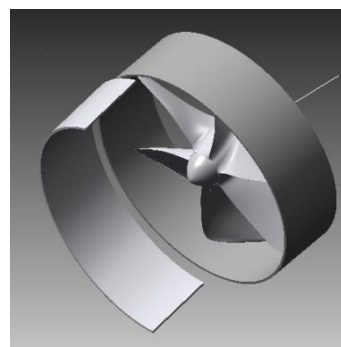
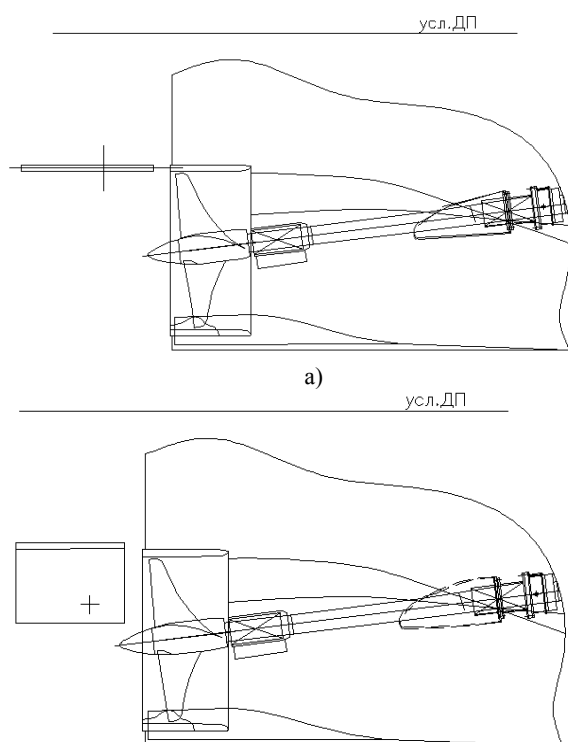


Рисунок 2 – Варианты компоновок кормовой части СВК с плоским (а) и радиальным (б) рулями

## 2. Применение CFD-моделирования для решения задач проектирования СДПП

Математическая постановка задачи CFD-моделирования гидродинамики струи ВД и расположенных в ее потоке рулей включает определение устойчивого численного решения нестационарных, осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса вязкого турбулентного течения несжимаемой жидкости. Для описания турбулентных процессов привлечена составная модель Ментера SST. Уравнения решаются в программном комплексе ANSYS CFX с использованием блочно-структурированных гексаэдрических сеточных моделей, что облегчает преобразование сетки при изменении положения руля и обуславливает надежность

решения по дискретизации моделируемого пространства. CFD-подход является распространенным инструментом решения исследовательских задач, возникающих при разработке новых проектных решений для скоростных судов и их движителей. В работе [2] обосновываются преимущества использования CFD-технологий по сравнению с использованием физического модельного эксперимента в ходе разработки аэрогидродинамической компоновки скоростного судна. В работе [3] авторы демонстрируют результаты успешного применения CFD-технологий в проектировании воздушных винтов судов на воздушной подушке. Основы методики CFD-моделирования аэрогидродинамики судна на воздушной подушке с учетом взаимодействия струи воздушного



вентилятора с внешней аэрогидродинамической средой изложены в работе [4]. Широкое внимание валидации блочно-структурированной гексаэдрической сеточной методологии в рамках CFD-подхода при проектировании скоростного судна уделено в работе [5]. В работах [6; 7] представлены результаты по CFD-моделированию гидродинамики водометных движителей с использованием неструктурированных сеточных моделей и без учета взаимодействия струи движителя с рулевыми поверхностями.

В принятой постановке задачи количество разбиений сеточной модели составляет около 1 млн элементов. Используется принцип обращения движения: движитель моделируется как сопло постоянного поперечного сечения, из которого истекает жидкость с заданным значением скорости поступательного движения и заданными компонентами скорости вращения [8]. Соответствующая выбранному режиму работы движителя скорость крейсерского движения СВК составляет около 60 км/ч, число Рейнольдса  $Re \sim 10^7$ . Испускаемая соплом жидкость обтекает рулевую поверхность. Окружающая движитель и рулевую поверхность водная среда перемещается со скоростью, равной обращенной скорости крейсерского движения судна, заданной на входной грани области моделирования. Таким образом, моделируются не только возмущения, вызываемые работой движителя, но и гидродинамическое взаимодействие испускаемой движителем струи и внешнего потока. Влияние свободной поверхности не учитывается. В будущих работах по CFD-моделированию аэрогидродинамики СВК представляется желательным учесть наличие двух фаз – водной и воздушной, а также учесть неравномерность распределения по диаметру сопла ВД вызванных скоростей движения жидкости, посредством моделирования вращения лопастей движителя с учетом их формы, формы кольцевой насадки, водозаборника и обводов корпуса судна. Однако для формирования общего представления о гидродинамических процессах, сопровождающих обтекание исследуемых рулей, достаточно решения задачи в изложенной постановке.

### 3. Валидация CFD-модели

Для валидации построенной сеточной модели выполнено CFD-моделирование обтекания плоского руля в безграничном потоке жидкости, движущейся с постоянной скоростью. Коэффициент боковой гидродинамической силы, действующей на руль, может быть представлен в форме (1).

$$c_y = \frac{2Y}{\rho V^2 S} = c_y^\alpha \cdot \alpha \quad (1)$$

$Y$  - значение боковой гидродинамической силы, Н,  $\rho$  - плотность жидкости,  $кг/м^3$ ;  $V$  - скорость, м/с;  $S$  - площадь руля,  $м^2$ ;  $c_y^\alpha$  -

производная коэффициента гидродинамической силы по углу атаки (в рассматриваемой задаче – углу перекадки) руля  $\alpha$ . Валидационные значения  $c_y$  определены по результатам расчетов с использованием традиционных вихревых методов [9]. Результаты валидации в виде зависимостей коэффициентов  $c_y$  от угла перекадки руля в сравнении с результатами численного моделирования условий интерференции испускаемой струи и внешнего обтекания представлены на рисунке 3 (вращение струи не учитывалось). Стоит отметить, что в традиционной практике проектирования судов расчет рулей часто выполняется без учета интерференции внешнего обтекания и испускаемой движителем струи, а также без учета срывных явлений, возникающих при больших углах атаки (перекадки). Линейная зависимость коэффициента гидродинамической силы от угла атаки справедлива для малых значений угла, что соответствует результатам, представленным на рисунке 3. В диапазоне значений  $\alpha \leq 20^\circ$  наблюдается хорошее согласование результатов расчетов, выполненных разными методами. Существенное отличие результатов CFD-моделирования с учетом и без учета взаимодействия внешнего потока и испускаемой движителем струи (при включении только поступательной компоненты скорости) для углов перекадки  $\alpha > 10^\circ$  обусловлено поджатием потока, обтекающего руль, внешним течением, что иллюстрируется данными рисунка 4: интенсивность вихреобразования при моделировании сопла движителя заметно ниже.

Традиционно при расчетах рулей в проектировании не учитывается вращательная компонента движения струи, которая наряду с взаимодействием внешнего течения и поступательного движения струи определяет гидродинамику рулевого комплекса. На рисунке 5 приведены результаты CFD-моделирования обтекания плоского руля с учетом и без учета вращательных составляющих скорости струи движителя.

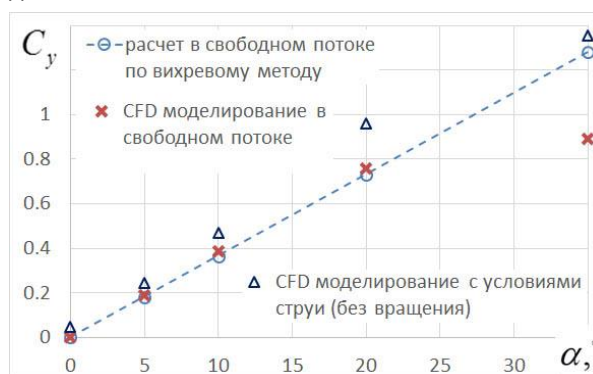


Рисунок 3 – Результаты валидации CFD-модели

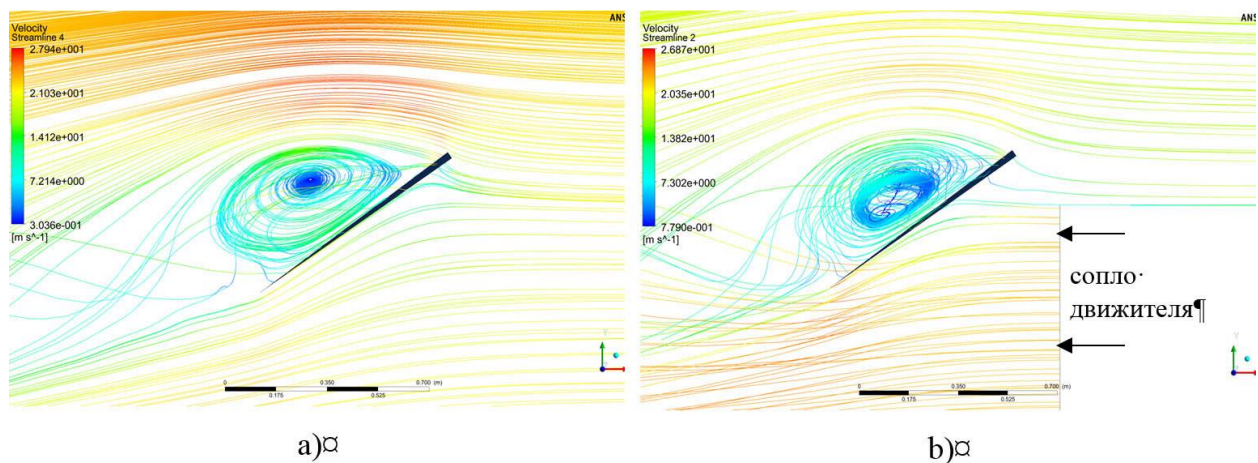


Рисунок 4 – Результаты CFD-моделирования в виде линий тока при  $\alpha=35^\circ$  обтекания руля без учета (а) и с учетом (б) взаимодействия струи движителя с внешним течением

Учет вращательной составляющей скорости приводит к увеличению коэффициента боковой гидродинамической силы  $c_y$  более чем в 1,5 раза при малых углах перекадки  $\alpha$ . Значения коэффициента сопротивления (2) при этом ниже на 15-20%.

$$c_x = \frac{2X}{\rho V^2 S} \quad (2)$$

где  $X$  - сила сопротивления руля.



Рисунок 5 – Результаты CFD-моделирования обтекания рулей струей движителя с учетом и без учета вращения

#### 4. Результаты расчета вариантов рулей

Выполнено CFD-моделирование обтекания радиального руля в составе компоновки ВД при различных углах перекадки. Результаты расчетов приведены в сравнении с результатами моделирования компоновки ВД с плоским рулем. Результаты показывают, что коэффициент сопротивления радиального руля на всех исследованных режимах незначительно отличается от коэффициента сопротивления плоского руля, в то время как коэффициент боковой силы радиального руля при умеренных углах перекадки более чем на 20% выше.

моделирования для разных расчетных случаев представлены на рисунках 6 и 7. Согласно данным рисунка 7, по мере увеличения угла отклонения интенсивность концевых срывов радиального руля растет медленнее, чем у плоского руля, за счет перераспределения потока к плоскости симметрии руля. Тем не менее, согласно данным рисунка 6, при больших углах перекадки  $\alpha > 20^\circ$  срывные явления, сопровождающие обтекание исследуемых рулей, приводят к уменьшению разницы их гидродинамических характеристик.

Гидродинамические характеристики рулей и структуры линий тока по результатам CFD-

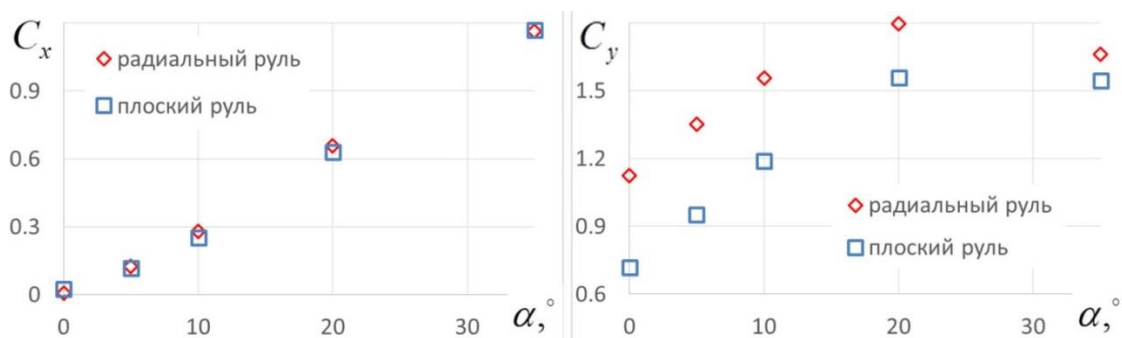


Рисунок 6 – Характеристики плоского и радиального рулей по результатам CFD-моделирования

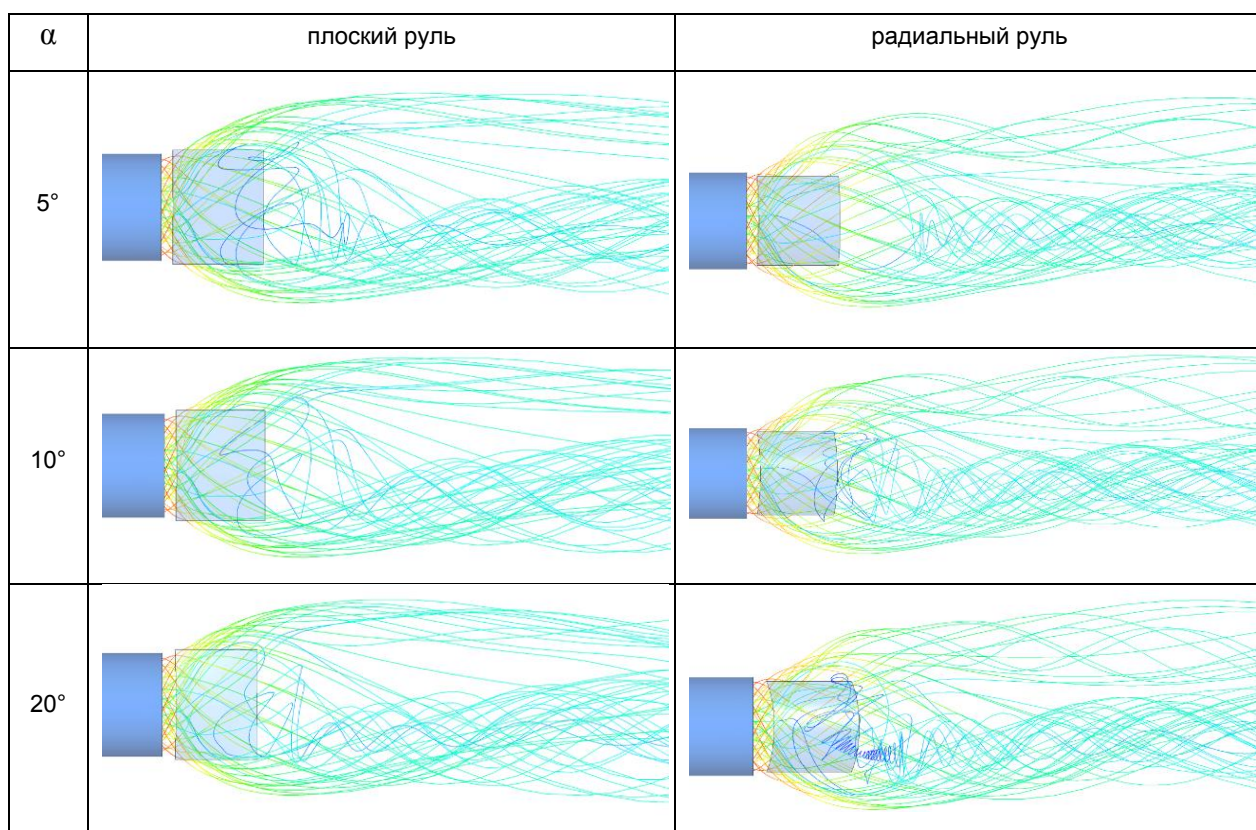


Рисунок 7 – Линии тока обтекания рулей при разных углах перекладки (вид на борт)

### Заключение

Выполнен анализ возможностей применения CFD-технологий численного моделирования гидродинамики для расчета характеристик рулей в составе компоновки ДРК водометного движителя. В отличие от традиционного проектного подхода к расчету рулей СВК, в использованной методике CFD-моделирования выполнен расчет рулей с учетом срывных явлений при больших углах перекладки, с учетом вращения струи движителя, а также её взаимодействия с внешним гидродинамическим потоком. Полученные результаты CFD-моделирования отличаются по значениям коэффициента боковой силы, действующей на

руль, более чем в 1,5 раза от результатов расчетов по традиционному подходу.

Выполнено CFD-моделирование гидродинамики плоского и радиального рулей. Результаты моделирования демонстрируют большие на 20% значения коэффициента боковой силы, действующей на радиальный руль при умеренных углах перекладки. Значения коэффициентов сопротивления рулей в исследованном диапазоне углов перекладки отличаются незначительно. Результаты работы могут быть использованы на ранних стадиях проектирования быстрого СВК при формировании технического предложения по принципиальной компоновке движительно-рулевого комплекса.



## Литература

1. Разработка концепции движительно-рулевого комплекса катера с воздушной каверной на базе проекта «Серна» / А.А. Николаева // V Международный Балтийский морской форум. V Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии»: тезисы докладов. Часть 1. - Калининград: Изд-во БГАРФ, 2017. – 222с. – с. 81-82.
2. Сравнительный анализ двух подходов к разработке аэрогидродинамической компоновки скоростного амфибийного судна / П.С. Кальясов, М.П. Лобачев, А.И. Лукьянов, А.В. Февральских, В.В. Шабаров // Морской вестник. – 2017. – № 3 (63) – ISSN: 1812-3694 – с. 22 - 27.
3. Результаты применения методов компьютерного имитационного моделирования в проектировании воздушных винтов АСВП / П.С. Кальясов, В.О. Еремеев // Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве. Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Р.Е. Алексева – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, 2016. – 652 с. – ISBN: 978-5-502-00824-2 – с. 232-237.
4. Математическое моделирование аэрогидродинамики амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой на режиме хода на воздушной подушке / П.С. Кальясов, А.В. Февральских, В.В. Шабаров // Проблемы прочности и пластичности – 2014. – № 76 (3). – ISSN: 1814-9146. – с. 263 – 268.
5. Разработка методики проектирования аэрогидродинамической компоновки амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой на основе численного моделирования: дис. ... канд. техн. наук / А.В. Февральских. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексева, 2017. – 175 с.
6. Расчет характеристик водометных движителей глиссирующих катеров / А.Я. Абдулин, А.В. Месропян // Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение. – 2014. – №1. – с. 41 – 51.
7. Численное моделирование работы водометного движителя на начальном этапе движения / Д.В. Багаев, А.Е. Таранов // Труды Крыловского государственного научного центра – 2013. – №78(362). – с. 65-68.
8. Справочник по теории корабля. Судовые движители и управляемость / Я.И. Войткунский, Р.Я. Першиц, И.А. Титов – Л.: Судостроение, 1973. – 511 с.
9. Тонкая несущая поверхность в дозвуковом потоке газа / С.М. Белоцерковский – М.: Наука, 1965. – 244 с.

## References

1. Nikolaeva A. A. Concept development of propulsion and steering system vessel with air cavity based on project "Serna". V International «Baltic marine forum». V International scientific conference "Marine technology and engineering. Safety of the marine industry": Abstracts 1. Kaliningrad, BFFSA 2017.p.p. 81-82.
2. Kalyasov P. S., Lobachev M. P., Lukyanov A. I., Fevral'skikh A. V., Shabarov V. V. Comparative analysis of two approaches to the development of aerohydrodynamics configuration of a high-speed amphibian vessel. Morskoy Vestnik, №63 (3), 2017, p.p. 22 – 27.
3. Kalyasov P. S., Eremeev V.O. Results of the use of methods of computer simulation in designing propeller ACV. Modern technologies in shipbuilding and aviation education, science and production. Collection of reports of the All-Russian scientific-practical conference, dedicated to the 100th anniversary of the birth of R.E. Alekseev. Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 2016, p.p. 232-237.
4. Kalyasov P. S., Fevral'skikh A. V., Shabarov V. V. Mathematical modeling of aerohydrodynamic of amphibious air-cushion vehicle with aerodynamic unloading on cushion regime. The problems of strength and plasticity, № 76 (3), 2014, p.p. 263 - 268.
5. Fevral'skikh A. V. The development of wing-in-ground effect hovercraft design method based on computational fluid dynamics (PhD thesis). Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 2017, p.175
6. Abduлин A. Y, Mesporyan A.V. Calculation of the water jet characteristics for planing boats. Vestnik SUSU. Series of machinery №1, 2014 p.p. 41-51.
7. Bagaev D.V., Taranov A.E. Numerical simulation of water-jet operation at the initial stage of movement. Transactions of the Krylov state research centre №78 (362), 2013, p.p. 65-68.
8. Voytkunsky Y.I., Pershitz R.Y, Titov I.A. 1. Guide to the theory of the ship. Ship propulsion and controllability. Leningrad, Shipbuilding, 1973, p.511.
9. Belotserkovsky S.M. Thin supporting surface in subsonic gas flow. Moskov, Science, 1965, p. 244.

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

УДК 629.12

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОМПЕНСАЦИИ ОТКЛОНЕНИЙ ТРАСС ТРУБОПРОВОДОВ СУДОВЫХ СИСТЕМ**

**Вьет Жа Нго**

аспирант кафедры " Судостроение и энергетические комплексы морской техники "  
Астраханский государственный технический университет  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16  
e-mail: ngogiaviet.ast@gmail.com

#### **Аннотация**

В представленной работе изложены пути решения некоторых проблем повышения технологичности трубопроводов на этапе проектирования. Авторами рассматриваются условия и возможности компенсации отклонений трассы трубопровода и соседних конструкций в процессе монтажа труб. Поставлена задача изготовления пригоняемой трубы по проектной информации без уточнения размеров и конфигурации по месту на судне. Пригоняемая труба изготавливается по проектной информации с назначением технических припусков на концевых участках в определенных направлениях при необходимости. Представлен метод компенсации отклонений трасс судовых трубопроводов с использованием поворотов пар параллельных участков труб. Разработан порядок компенсации и монтаж трубопроводов из готовых труб, изготавливаемых по проектной информации без уточнения размеров по месту. Выполнено математическое и графическое моделирование процесса компенсации отклонений трасс судовых трубопроводов при их монтаже.

**Ключевые слова:** судовые трубопроводы, моделирование систем трубопроводов, пригоняемая труба, область компенсации, параллельные участки труб

### **MODELING DEVIATION COMPENSATION OF PIPELINE ROUTES IN SHIP SYSTEMS**

**Viet G. Ngo**

postgraduate student of the department " Shipbuilding and marine power engineering complexes "  
Astrakhan State Technical University  
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation  
e-mail: ngogiaviet.ast@gmail.com

#### **Abstract**

In this paper the solutions for problems related to increase in manufacturability of pipelines at a design stage are stated. The authors consider conditions and possibilities for compensating deviations of the pipeline route and adjacent structures during pipe installation. The task was set to produce a fit pipe to be supplied according to the design information without specifying dimensions and configuration in place on the ship. The fit pipe is manufactured according to the design information with the assignment of technical allowances at the end sections in certain directions, if necessary. A method is presented for compensating deviations in the routes of ship pipelines using rotations of pipe parallel section pairs. The procedure for compensation and installation of pipelines from prefabricated pipes manufactured according to design information without specifying dimensions of the site has been developed. Mathematical and graphic modeling of deviation compensation in pipelines during their installation is performed.

**Key words:** ship pipelines, modeling of pipeline systems, fit pipe, compensation area, parallel sections of pipe.

#### **Introduction**

A modern vessel is a complex multifunctional technological complex comprising various types of

equipment, mechanisms and other structures for the operation of which piping systems serve.

In global shipbuilding there are significant changes in the methods of design, technology of manufacturing and installation of ship pipelines.



Nowadays it is typical to apply on a wide scale system approach to complex solution of design issues, technological preparation of production and manufacturing pipelines based on extensive use of computer technology [1-6].

At present, even with the development of automated pipeline design systems, the share of pipelines produced according to project information in advance in the shop is about 40%. The remaining part of pipes, called fit pipes, can only be manufactured after dimensions have been removed on the spot. This affects adversely both construction time of the vessel and final cost of work [7].

In connection with the foregoing, the key contemporary approaches to the design, manufacture and installation of ship pipelines is to develop a concept for improving manufacturability of pipelines and eliminating the need for dimensioning at a place on the ship when performing shipbuilding orders.

### 1. Handling the issue of fit pipes

Fit pipes are those pipes, that are installed last and compensate for inaccuracies in the construction of the hull, inaccurate installation of mechanisms and fittings to which they join, and inaccuracies in the manufacture of pipes. Fit pipes made on the basis of the design model, where all equipment is installed in regular places, will be unsuitable for installation on the ship, where the equipment is installed with certain tolerances. Therefore, it is necessary to take into account actual dimensions and position of hull structures and system components based on measurements of the actual position of pipes on the vessel.

A characteristic feature of fit pipes is that they can be manufactured only after main pipes of the pipeline route have been installed. To compensate for all possible deviations in the route in three coordinate directions, the adjusted pipe must always have at least two bends. Due to allowances at the ends of the pipe, it is possible to compensate for deviations in two coordinate directions. Deviation in the third direction is refined in place and compensated for by the received size for bending of the pipe. Therefore, fit pipes cannot be manufactured in advance, since the size between bends is used as compensation for deviations and will be known only after the installation of main pipes for each route. In addition, manufacturing process of fit pipes is much more labor-intensive than production of main pipes and additionally includes removal of the template in place and fitting locally.

In connection with the foregoing, to improve manufacturability of pipelines, the fit pipe must be manufactured according to design information without specifying dimensions in place. Design documentation for fit pipes will differ from documentation for the main pipes only by presence of technological allowances at the ends of the pipe. For the successful installation fit pipe routes, during

the installation it is necessary to be able to move the route, compensating for the deviations of both pipes and adjacent structures in directions that cannot be compensated for by allowances on the fit pipe [8, 9]. The pipeline route must be able to be moved at least in one coordinate direction.

In the work [8] it is established that movement of the route is possible if there are parallel section pairs and free connections located in these sections in the route. Based on the results of the study, a formula is defined for the area of compensation capacities of pipeline routes using rotations of pipe parallel sections pairs:

$$\overline{\Delta S}(t_1, t_2, \dots, t_n) = \sum_{i=1}^n (R_i \sin(t_i) \overline{u}_i - R_i (1 - \cos(t_i)) \overline{e}_i)$$

where:

$\overline{\Delta S}$  – area of route compensation capacities;

$n$  – number of parallel pipe section pairs;

$t_1, t_2, \dots, t_n$  – rotation angles of corresponding of parallel pipe section pairs;

$R_i$  – rotation radius of parallel pipe section pairs;

$\overline{u}_i, \overline{e}_i$  – basic vectors to the rotation circle of parallel section pairs.

### 2. Modeling the process of compensating pipeline deviations

Траектория The pipeline trajectory (route) is given by a sequence of points  $T_1, T_2, \dots, T_m$ . Each of them can be either a bend point (change of the route direction), or a point of 2-pipe connection (without changing route direction). Numbers (indices) of connection points are specified by an array  $s_1, s_2, \dots, s_j$ . If necessary  $s_j$  can be calculated using  $T_j$ . The route must connect start and end points, whose exact position (relative to each other) at the time of route design remains unknown. The error is determined by the *area of possible deviations* at the end point of the route. This area is given in the form of a rectangular parallelepiped (determined by maximum deviations from the end point of the route for each of the coordinates).

The part of the route where the initial and final straight sections are parallel can be used to move the end point of the route by turning the route in the connections located on these straight sections to angles up to the restriction of adjacent structures. The area that will be described by the end point  $A = T_m$ , is *area of possible deviation compensation*. When the route is rotated around the axis of its first segment, the route end point forms an arc of the circle. If there is a section parallel to the first in the route, then after part of the route that is located behind the second parallel section, has rotated to the same angle but in the opposite direction, all parts of this part of the route remain parallel to its original

position. The end point position of the route will correspond to the result of its moving along an arc formed by transferring the second parallel section relative to the first. Such displacements can be made using parallel sections located anywhere in the route, i.e. transferring the arcs formed by them to the final point of the route and using them to move the route during its installation in order to compensate for the deviations that have arisen.

When two different pairs of parallel sections rotate, the end point of the route moves along a certain surface.

When three or more pairs of segments rotate, compensation area is a three-dimensional body. These arcs, surface and the three-dimensional body determine compensation areas.

Let's fix mathematically basic concepts.

*Parallelism of sections.* There is part of the route given by points  $T_i, T_{i+1}, \dots, T_{j-1}, T_j; j \geq i + 2$ . In addition to the initial and final, there must be at least two bending points so that the sections can be parallel. Parallelism of route sections can be determined from the angle between the directions at the beginning (the first section) and at the end (the second section).

Direction at the beginning:  
 $\vec{V}_1 = \overrightarrow{OT_{i+1}} - \overrightarrow{OT_i}$ , after rationing:  $\vec{v}_1 = \frac{\vec{V}_1}{|\vec{V}_1|}$ .

Direction at the end:  
 $\vec{V}_2 = \overrightarrow{OT_j} - \overrightarrow{OT_{j-1}}; \vec{v}_2 = \frac{\vec{V}_2}{|\vec{V}_2|}$ . The angle is

determined by scalar or vector product:  
 $\cos \gamma = (\vec{v}_1, \vec{v}_2); \sin \gamma = [\vec{v}_1, \vec{v}_2]$ .

For parallel lines:  $\cos \gamma = 1; \sin \gamma = 0$   
 (1)

If two sections meet this requirement, then parameters of the circle arc are determined. It will be described by the second section when it is rotated relative to

$$\overrightarrow{OP_2}(t_1, t_2) = R_1 \sin(t_1) \vec{u}_1 - R_1 (1 - \cos(t_1)) \vec{e}_1 + R_2 \sin(t_2) \vec{u}_2 - R_2 (1 - \cos(t_2)) \vec{e}_2;$$

$$-\alpha_1 \leq t_1 \leq \beta_1; -\alpha_2 \leq t_2 \leq \beta_2$$

Compensation area  $S_3$ , acquired by use of three arcs:

$$\overrightarrow{OP_3}(t_1, t_2, t_3) = R_1 \sin(t_1) \vec{u}_1 - R_1 (1 - \cos(t_1)) \vec{e}_1 + R_2 \sin(t_2) \vec{u}_2 - R_2 (1 - \cos(t_2)) \vec{e}_2 + R_3 \sin(t_3) \vec{u}_3 - R_3 (1 - \cos(t_3)) \vec{e}_3;$$

$$-\alpha_1 \leq t_1 \leq \beta_1; -\alpha_2 \leq t_2 \leq \beta_2; -\alpha_3 \leq t_3 \leq \beta_3$$

For a graphical representation each of the variables is fixed at the boundary value. As a result, we obtain 6 surfaces bounding area  $S_3$ .

$$\overrightarrow{OP_n}(t_1, t_2, \dots, t_n) = \overrightarrow{OK} + \sum_{i=1}^n (R_i \sin(t_i) \vec{u}_i - R_i (1 - \cos(t_i)) \vec{e}_i)$$

$$-\alpha_i \leq t_i \leq \beta_i$$

where  $P_i$  – arbitrary point of surface  $S_k$ .

Since the area is modeled in three-dimensional space, only three parameters  $t_i$  can be independent

the axis formed by the direction of the first one.

*Normal.* The normal is the direction at the beginning:  $\vec{n} = \vec{v}_1$ .

*Radius.* To determine the radius, a vector is defined that connects the beginning of the first and the end of the second section  $\Delta \vec{T} = \overrightarrow{OT_j} - \overrightarrow{OT_i}$ . Then the radius is given by:

$$R = \sqrt{(\Delta \vec{T}, \Delta \vec{T}) - (\Delta \vec{T}, \vec{n})^2}$$

If the radius is close to zero, then both sections lie on one line and their rotation is not considered.

*Centre.* The center is obtained by parallel transfer from the end of the second section to the end of the route:

$$\overrightarrow{OC} = \overrightarrow{OT_m} + (\Delta \vec{T}, \vec{n}) \cdot \vec{n} - \Delta \vec{T}$$

*Basis vectors.* To specify the plane of a circle, three basis vectors are necessary. One of them (the normal) has already been found, the other two are determined by the relations:

$$\vec{e} = \frac{\overrightarrow{OT_m} - \overrightarrow{OC}}{R}, \quad \vec{u} = [\vec{n}, \vec{e}]$$

Equation of circle  $S_1$ .

$$\overrightarrow{OP_1}(t_1) = R_1 \sin(t_1) \vec{u}_1 - R_1 (1 - \cos(t_1)) \vec{e}_1; -\alpha_1 \leq t_1 \leq \beta_1$$

where  $P_1$  – arbitrary point of the first circle.

*Compensation area.* After determining all straight sections of the route and successive connections of pipes, options with parallel sections are selected, checking condition (1). The resulting sequence of circles is the material for constructing compensation area.

Compensation area  $S_2$ , acquired by use of two arcs:

Compensation area  $S_k$ , acquired by use of  $k$  arcs ( $k \geq 3$ ):

intersect and contain point  $A$ . Combining them, we obtain area  $S_k$ .

*Deviation area.* There is deviation area, given in the form of a parallelepiped, i.e. maximum deviations from the end point of the route are given for each of the coordinates  $\Delta = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]$ . At partial absorption of deviation parallelepiped by route compensation capacities area there is a possibility of partial compensation for deviations (see Fig. 1). When the deviation parallelepiped is completely absorbed by route compensation capacities area, it is viable to completely compensate for the deviations (see Fig. 2).

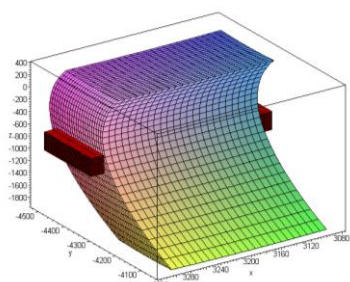


Fig. 1 – Partial compensation

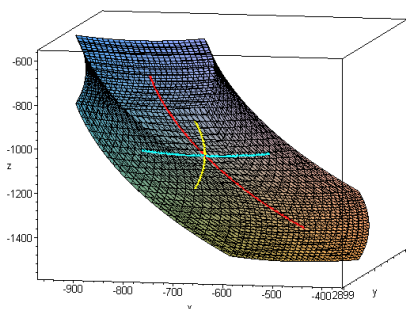


Fig. 2 – Full compensation

Modeling the process of deviation compensation is presented on the example of a 4-pipe route connecting the weld on the bulkhead to the pump (Fig. 3 – 5). In each of the five connections of the route there are free flanges, which allow turning the pipes in the joints around the pipeline axis at angles up to  $360^\circ$ .

In accordance with the current technology for project information, only three pipes are manufactured (in reserve); mounted on the ship; dimensions of the fourth pipe are determined by location and only after that manufacturing process begins. This drags out construction of the ship significantly.

A new conceptual approach to the design, manufacture and installation of pipeline routes, based on the relationship of configuration and compensation capacities of the project route, provides for simultaneous manufacture and subsequent installation of all four pipes (Fig. 3a).

Let's consider in more detail the process of deviation compensation: discrepancy between the flange of the last pipe and the flange of the pump branch has occurred in all three coordinate directions of 30 mm (see Fig. 3b).

When the last pipe is rotated, before the point of the route coincides with X axis, deviation along Z axis is compensated (see Fig. 4a).

Rotation of the third pipe removes deviation along X axis (see Fig. 4b).

It remains to compensate for deviation along Y axis (see Fig. 4c). By turning the first pipe, the route is connected to the pump (see Fig. 4d).

Compensation for deviations and installation of the route have been successfully completed (see Fig. 5).

Depending on the actual position of the pump and the bulk pick-up, the direction and magnitude of rotation angles of pipes during installation will change.

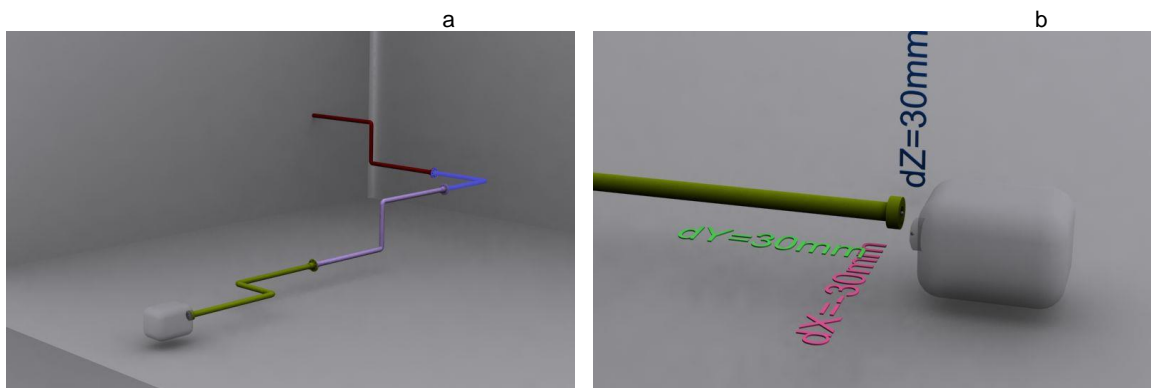


Fig. 3 – Pipeline route  
a – route before compensation; b – deviations in three coordinate directions  $dx, dy, dz$

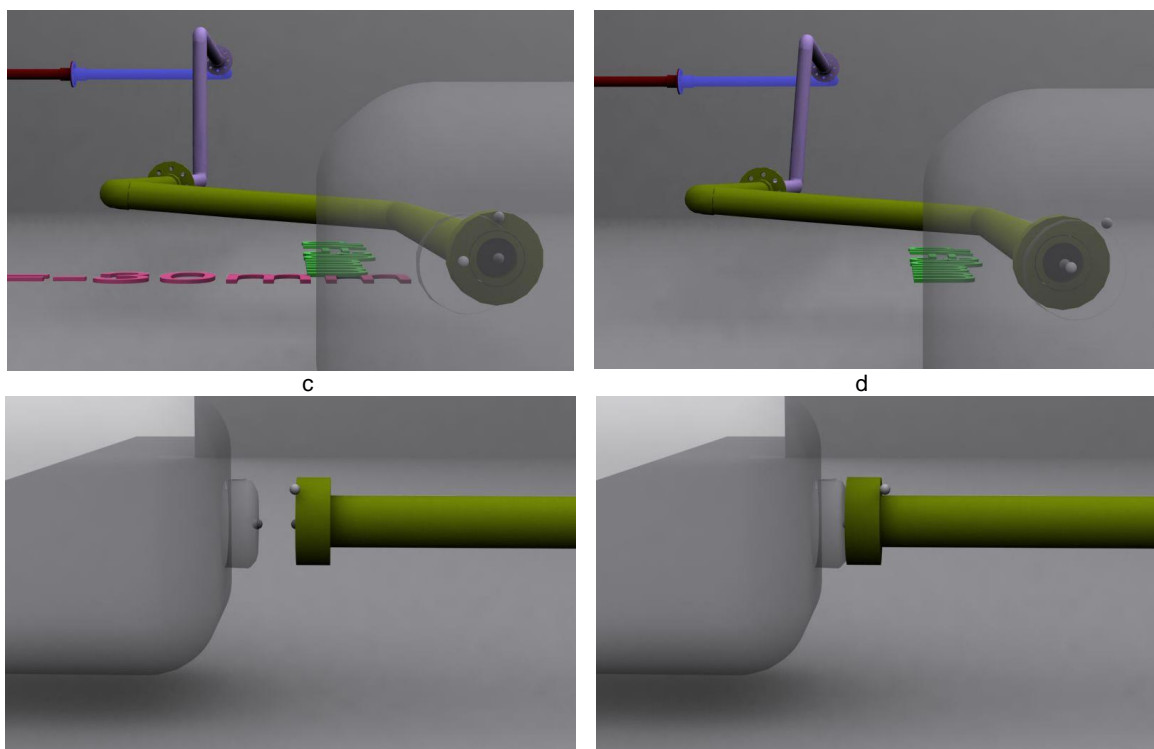


Fig. 4 – Compensation for route deviations  
 a - compensation of deviation  $dz$  by rotating the last (green) pipe  
 b - compensation of deviation  $dx$  by rotating the third (violet) pipe  
 c - deviation in the remaining coordinate direction  $dy$   
 d - rotations of the first (red) pipe to compensate for deviation  $dy$

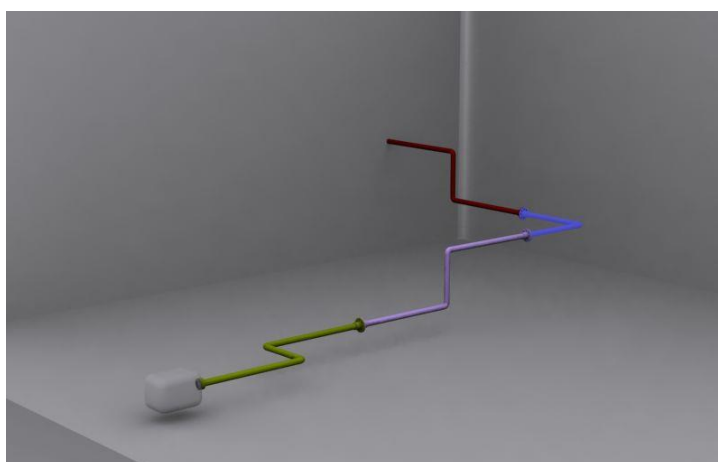


Fig. 5 – Route after compensation for deviations  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  - installation completed successfully

**Conclusion**

In course of research, modeling compensation process for deviations in the ship pipeline routes was performed using rotations of parallel pipe section pairs during their installation. The procedure for compensation and installation of pipelines from prefabricated pipes manufactured according to design information without specifying the dimensions in place has been developed.

With regard to more pipelines, it is feasible to use fit pipes to compensate for deviations. Bending of such pipes will be carried out according to project sizes, without clarification in place. This contributes to reducing construction period of facilities, composite technological complexes equipped with pipelines.

**Литература**

1. Fan J. Research on automatic laying out for external pipeline of aero-engine / J. Fan, M. Ma, X. G. Yang // Journal of Machine Design, vol. 20, no. 7, pp. 21–23, 2003.
2. Jiang W.Y. A co-evolutionary improved multi-ant colony optimization for ship multiple and branch pipe route design / W.Y. Jiang, Y. Lin, M. Chen, Y.-Y. Yu // Ocean Engineering, vol. 102, pp. 63–70, 2015.

3. Ito T. Heuristics for route generation in pipe route planning / T. Ito // in Proceedings of the 12th European Simulation Symposium (ESS '00), pp. 178–182, Hamburg, Germany, 2000.
4. Qu Y. F. Pipe routing approach for aircraft engines based on ant colony optimization / Y. F. Qu, D. Jiang, G. Y. Gao, Y. Huo // Journal of Aerospace Engineering, vol. 29, no. 3, 2016.
5. Wang C. E. Projection and geodesic-based pipe routing algorithm / C. E. Wang, Q. Liu // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 8, no. 3, pp. 641–645, 2011.
6. Wang H. L. Three-dimensional multi-pipe route optimization based on genetic algorithms / H. L. Wang, C. L. Zhao, W. Ch. Yan // in Knowledge Enterprise: Intelligent Strategies in Product Design, Manufacturing, and Management, Proceedings of PROLAMAT 2006, IFIP TC5 International Conference, Shanghai, China, 2006, pp. 177–183, Springer, 2006.
7. Богачев, А. М. Совершенствование трубообрабатывающего производства в условиях совмещения работ по судостроению и судоремонту / А. М. Богачев // Технология судостроения. – 1988. – № 5. – С. 25–28.
8. Нго Ж. В. Исследование компенсационных возможностей проектной трассировки трубопроводов судовых систем / Ж. В. Нго, К. Н. Сахно // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 1. – С. 157–164.
9. Сахно К. Н. Научные основы повышения технологичности трубопроводов судовых систем на стадии проектирования: дис. ... д-ра техн. наук / К. Н. Сахно. – Астрахань, 2012. – 353 с.

#### References

1. Fan J. Research on automatic laying out for external pipeline of aero-engine J. Fan, M. Ma, X. G. Yang // Journal of Machine Design, vol. 20, no. 7, pp. 21–23, 2003.
2. Jiang W.Y. A co-evolutionary improved multi-ant colony optimization for ship multiple and branch pipe route design / W.Y. Jiang, Y. Lin, M. Chen, Y.-Y. Yu // Ocean Engineering, vol. 102, pp. 63–70, 2015.
3. Ito T. Heuristics for route generation in pipe route planning / T. Ito // in Proceedings of the 12th European Simulation Symposium (ESS '00), pp. 178–182, Hamburg, Germany, 2000.
4. Qu Y. F. Pipe routing approach for aircraft engines based on ant colony optimization Y. F. Qu, D. Jiang, G. Y. Gao, Y. Huo // Journal of Aerospace Engineering, vol. 29, no. 3, 2016.
5. Wang C. E. Projection and geodesic-based pipe routing algorithm / C. E. Wang, Q. Liu // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 8, no. 3, pp. 641–645, 2011.
6. Wang H. L. Three-dimensional multi-pipe route optimization based on genetic algorithms / H. L. Wang, C. L. Zhao, W. Ch. Yan // in Knowledge Enterprise: Intelligent Strategies in Product Design, Manufacturing, and Management, Proceedings of PROLAMAT 2006, IFIP TC5 International Conference, Shanghai, China, 2006, pp. 177–183, Springer, 2006.
7. Bogachev, A.M. Perfection of pipe-making production in conditions of combining works on shipbuilding and ship repair / AM Bogachev // Technology of shipbuilding. - 1988. - № 5. - pp. 25-28.
8. Ngo G. V. Investigation of compensatory capabilities of project tracing of pipelines of ship systems / G. V. Ngo, K.N. Sakhno // Vestnik of State University of Marine and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov. - 2017. - Т. 9. - No. 1. - pp. 157-164.
9. Sakhno K.N. Scientific bases of increase of manufacturability of pipelines of ship systems at a design stage: PhD thesis / K.N. Sakhno. - Astrakhan, 2012. - 353 p.



УДК 629.5.035-233.1.081.4:629.5.021.18

## К ВОПРОСУ ЦЕНТРИРОВАНИЯ ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ СБОРОЧНО - МОНТАЖНЫХ ЕДИНИЦ СУДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Николай Иванович Герасимов**

доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник  
Акционерного общества «Центр технологии судостроения и судоремонта», 198095, Санкт-Петербург, ул.  
Промышленная, д.7

тел. (812) 610-65-48 e-mail: 3331@sstc.spb.ru

**Иван Владимирович Грачев**

начальник сектора технологий сборки и монтажа энергоустановок  
Акционерного общества «Центр технологии судостроения и судоремонта», 198095, Санкт-Петербург, ул.  
Промышленная, д.7

тел. (812) 610-65-86 e-mail: 3331@sstc.spb.ru

### Аннотация

В работе рассматривается процесс центрирования тяжеловесных сборочно-монтажных единиц судового оборудования при постройке объектов морской техники. Авторами акцентируется техническая проблема точного базирования сборочных изделий относительно судовых монтажно-базовых плоскостей. Кратко описываются физическая сущность механизма «скачкообразного» перемещения тяжеловесного тела и возникающие сложности достижения точных перемещений.

На основании выполненных исследований авторами установлены функциональные зависимости путей перемещения центрируемого объекта от значений жесткости технологических упоров, необходимых для создания боковых или продольных усилий.

Даны рекомендации и формулы для точного определения пути перемещения при штатной установке сборочно-монтажной единицы судового оборудования относительно базовых плоскостей судового помещения.

Приведены расчеты ожидаемых перемещений тяжеловесных изделий при выполнении нагружений отжимными устройствами и рекомендации точного базирования тяжеловесов при использовании технологических отжимных упоров, установленных на расчетном расстоянии с противоположной стороны.

Излагаемый материал статьи иллюстрирован рисунками, таблицами и графиками. Авторами даются пояснения и конкретные выводы в целом по работе, являющимися технологическими рекомендациями центрирования судового оборудования.

В статье даются ссылки на литературные источники, подтверждающие или разъясняющие излагаемый материал.

**Ключевые слова** Сборочно-монтажные единицы, центрирование, базирование, монтажно-базовые плоскости, отжимные устройства, статическое и динамическое трение

## CENTERING OF HEAVY-WEIGHT ASSEMBLY AND INSTALLATION UNITS OF SHIP EQUIPMENT

**Nikolay I. Gerasimov**

Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher  
Joint Stock Company "Shipbuilding & Shiprepair Technology Center" (JSC "SSTC"),  
198095, Saint-Petersburg, 7, Promyshlennaya Street

**Ivan V. Grachev**

Head of the sector of technologies for assembly and installation of power plants  
Joint Stock Company "Shipbuilding & Shiprepair Technology Center" (JSC "SSTC"),  
198095, Saint-Petersburg, 7, Promyshlennaya Street

### Abstract

This paper considers the process of centering heavy-weight assembly and installation units of marine equipment. The authors emphasize the technical problem of the exact basing of assembly products regarding ship mounting-base planes. The article deals with the physical essence of the "hopping" movement mechanism of heavy body and emerging difficulties of achieving accurate displacements.

Based on the research carried out by the authors, functional dependences of paths of movement of the centered object on the values of stiffness of technological stops required to create lateral or longitudinal forces are established.

There are recommendations and formulas to determine the exact displacement path during normal installation of assembly units of marine equipment relative to the reference planes of the ship premises.

There are calculations of the expected movements of heavyweights with carrying out loads by squeezing devices and recommendations for the exact basing of heavyweights with the use of technological squeezing devices installed at the calculated distance from the opposite side.

The article is illustrated with figures, tables, and graphs. The authors give explanations and specific conclusions in general on the work, which are technological recommendations for the centering of ship equipment.

The article gives references to literature sources that confirm or clarify the material presented in this paper.

**Key words** Assembly and mounting units, centering, basing, mounting-base planes, squeezing devices, static and dynamic friction.

**Введение**

В практике модульно-агрегатных методов (МAM) монтажа тяжеловесных крупногабаритных сборочно-монтажных единиц (СМЕ) энергоустановок или общего судового оборудования сложной и ответственной задачей является обеспечение точного базирования СМЕ относительно монтажно-базовых плоскостей (МБП) строящегося или ремонтируемого судна [1,2,3,4,5]. При этом в большинстве случаев установка собранных изделий в исходное положение осуществляется в затесненных судовых условиях с соблюдением жестких требований проектной документации по точному совмещению стыкуемых конструкций, получению необходимых зазоров и т.п. Для достижения точной установки оборудования на судовом фундаменте применяют процессы центрирования в горизонтальной плоскости и по высоте путем использования специальных средств оснащения, конструктивно представляющих простые технологические устройства, позволяющие создавать необходимые усилия для перемещения изделий. В судостроении и судоремонте применяются различные типы центрирующих устройств, чаще всего отжимные болтовые конструкции или клиновые, пневмогидравлические домкраты, которые, как правило, используются для центрирования более тяжеловесных изделий (рис.1, 2, 3). Часто процесс центрирования СМЕ, имеющих значительные массы, осуществляют на телах вращения, например, на шариковых устройствах (рис.3), на подкладках, изготовленных из полимерных материалов [6, 7, 8, 9, 10].

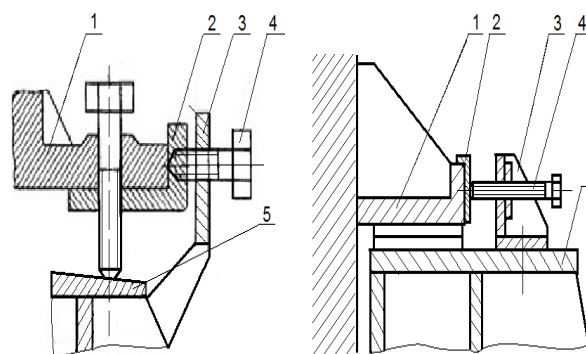


Рисунок 1 Схемы центрирующих устройств с использованием отжимных болтов

1 - полка опорная СМЕ; 2 – планка для упора; 3 – кронштейн устройства для центрирования; 4 – болт отжимной; 5 – полка судового фундамента

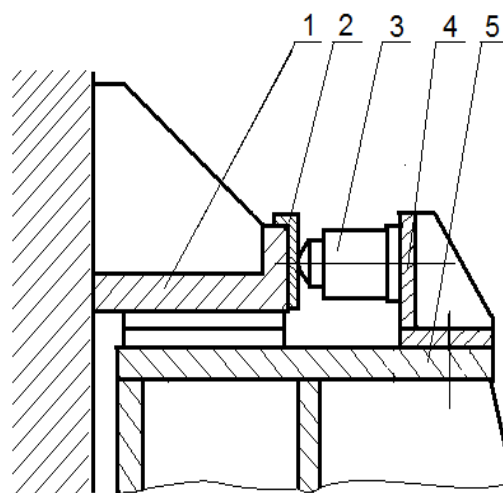


Рисунок 2 Схема центрирующего устройства с использованием домкрата  
1 - полка опорная СМЕ; 2 – планка для упора; 3 – домкрат; 4 – кронштейн устройства для центрирования; 5 – полка судового фундамента

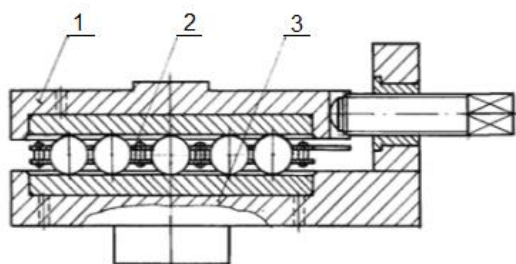


Рисунок 3 - Устройство центрирующее

1 – плита опорная; 2 – сепаратор; 3 – основание

**1. Физико-математическая модель процесса центрирования**

В процессе центрирования в горизонтальной плоскости часто требуется определить на какой отрезок пути  $\Delta l_s$  переместится СМЕ при воздействии на нее тем или иным отжимным устройством. В этом случае, зная величину  $\Delta l_s$ , можно точно прогнозировать в какое положение встанет СМЕ относительно МБП помещения, например диаметральной плоскости (ДП) судна. Однако, из опыта выполнения механомонтажных работ было установлено, что перемещение изделия при воздействии на него определенным усилием является не плавным, а скачкообразным, что не позволяет сместить сборку на установленную расчетную величину. В этой связи совмещение монтажно-базовых плоскостей СМЕ и судового помещения подчас становится длительным по времени и трудозатратным процессом.

Рассмотрим физику процесса перемещения в горизонтальной плоскости изделия при выполнении центрирования последнего относительно базовых плоскостей.

Очевидно, что отрезок пути  $\Delta l_s$  является функционально зависимой величиной от жесткости отжимных устройств, массы тела и коэффициента трения. В дальнейшем будем считать механизм работы отжимного устройства и упора, как работу сжатой пружины.

Пусть на абсолютно жесткое тело массой  $G$  действует постепенно возрастающая сила  $P$ , создаваемая отжимным устройством. При этом само отжимное устройство упруго деформируется подобно сжимаемой пружине.

По достижению максимального своего значения на отжимном устройстве сила  $P_{max}$  становится равной или чуть больше силы сопротивления – силы трения покоя и приводит тело в движение. При этом, после начала движения (почти мгновенно), сила сопротивления становится значительно меньше, т.к. динамический коэффициент трения  $f_0$  меньше трения покоя  $f_n$ . Накопленная сила  $P_{max}$  в упруго деформированном отжимном устройстве заставляет тело пройти определенный отрезок пути  $\Delta l_s$ .

Для решения поставленной задачи напишем уравнение функциональной зависимости силы  $P_1$  от ее перемещения. Зависимость усилия от перемещения для пружины является линейной, тогда в точке  $\Delta l_i$  (текущая координата) переменная сила  $P_1$  будет иметь следующий вид

$$P_1 = P_{max} - C_n \cdot \Delta l_i, \quad (1)$$

где  $P_{max}$  – максимальная сила, при которой начинается перемещение тела, Н;

$C_n$  – линейный коэффициент пропорциональности (жесткости) отжимного устройства, Н/мм.

Принимаем условие, что сила динамического трения является постоянной величиной на всем протяжении перемещения тела (рис. 3).

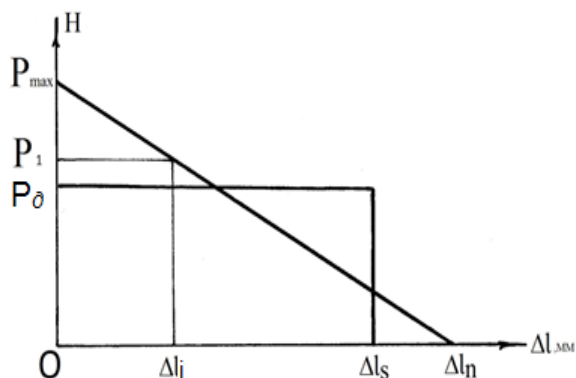


Рисунок 3 – Схема графических зависимостей сил от пути перемещения тела при нерегулируемом центрировании

Определим работу, совершаемую пружиной до остановки тела

$$A_n = \int_0^{\Delta l_s} (P_{max} - C_n \Delta l_i) d \Delta l$$

где  $\Delta l_s$  – координата остановки тела;  $\Delta l_i$  – i-ая упругая деформация отжимного устройства – текущая координата, мм.

При этом работа трения будет составлять

$$A_{P_0} = P_0 \Delta l_s$$

где  $P_0$  – динамическая сила трения, Н.

Так как произведенная работа по перемещению тела  $A_n$  полностью затрачена на работу трения  $A_{P_0}$ , то приравняв указанные работы, найдем  $\Delta l_s$ .

$$\int_0^{\Delta l_s} (P_{max} - C_n \Delta l_i) d \Delta l = P_0 \Delta l_s$$

$$P_{\max} \Delta l_s - C_n \frac{\Delta l_s^2}{2} = P_{\delta} \Delta l_s$$

$$\Delta l_s = \frac{2(P_{\max} - P_{\delta})}{C_n} \quad (2)$$

Учитывая, что  $P_{\max} = C_n \Delta l_n$ , а  $P_{\delta} = f_{\text{мп}} G$ , то формулу (2) можно представить в следующем виде:

$$\Delta l_s = 2 \left( \Delta l_n - f_{\delta} \frac{G}{C_n} \right) \quad (3)$$

Проведем исследование уравнения функциональной зависимости  $\Delta l_s$  (2) от различных значений  $C_n$ .

Принимаем следующие конкретные данные:

- массу центрируемого объекта – 100 т;
- коэффициент трения покоя –  $f_n = 0,3$ ;
- коэффициент трения в динамике –  $f_{\delta} = 0,18$ ;
- линейный коэффициент пропорциональности (жесткости) отжимного устройства  $C_n$  в диапазоне от  $0,1 \cdot 10^5$  до  $0,6 \cdot 10^5$  Н/мм.

Так как  $P_{\max}$  равна силе трения покоя, то  $P_{\max} = f_n \cdot G = 300 \text{кН}$ , сила динамического сопротивления будет равна  $P_{\delta} = f_{\delta} \cdot G = 180 \text{кН}$

Произведем расчет и занесем данные в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты расчета значений нерегулируемого перемещения тела от изменения коэффициента жесткости отжимного устройства**

N п/п	$C_n$ , Н/мм	$\Delta l_s$ , мм	$P_{\max}$ , Н	$P_{\delta}$ , Н
1	$0,1 \times 10^5$	24	$3 \times 10^5$	$1,8 \times 10^5$
2	$0,15 \times 10^5$	16	- « -	- « -
3	$0,3 \times 10^5$	8,0	- « -	- « -
4	$0,6 \times 10^5$	4,0	- « -	- « -
5	$0,75 \times 10^5$	3,2	- « -	- « -
6	$1 \times 10^5$	2,4	- « -	- « -
7	$1,5 \times 10^5$	1,6	- « -	- « -

По результатам расчета построим кривую зависимости  $\Delta l_s$  от коэффициента жесткости отжимного устройства  $C_n$  (рис. 4).

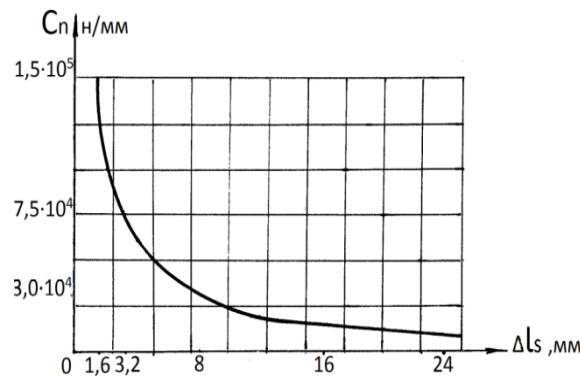


Рисунок 4 – График зависимости перемещения объекта от коэффициента жесткости отжимного устройства.

## 2. Основные рекомендации

Из анализа графика рис. 4 очевидно, что с повышением жесткости отжимного устройства уменьшается свободный путь перемещения тела. Таким образом, при необходимости перемещения тела на величины, исчисляемые в десятых долях мм, необходимо использовать жесткие отжимные устройства. Однако при точном центрировании тяжеловесных агрегатов с массами свыше 100 т потребуются создание громоздких и неудобных в работе технологических отжимных устройств. Кроме того, определение значения общей жесткости устройств выполнить весьма затруднительно. Однако, определить  $C_n$  можно путем решения обратной задачи по формуле (2), осуществляя пробное нагружение отжимного устройства и измеряя пройденный путь  $\Delta l_s$  и силу срагивания СМЕ.

Поэтому для проведения более точного центрирования устанавливают с другой стороны агрегатов ограничительные упоры, позволяющие ограничивать или регулировать свободное перемещение агрегата. В этой связи рассмотрим вторую схему сил воздействия на центрируемое тело, в которой в отличие от первой на тело с противоположной стороны от силы, создаваемой отжимным устройством, действует сила или с самого начала центрирования или в процессе его перемещения.

Графическое изображение зависимостей действующих сил показано на рис.5.

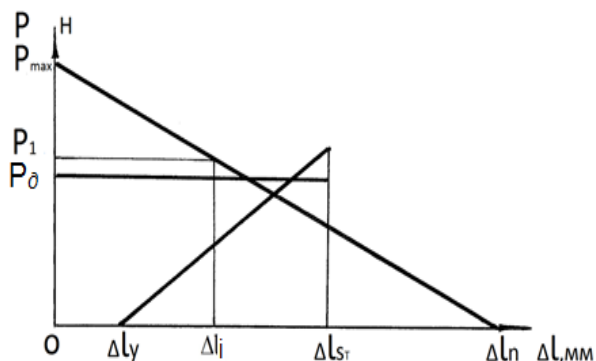


Рисунок 5 – Схема графических зависимостей сил от пути перемещения тела при регулируемом центрировании

Пусть к абсолютно жесткому телу массой  $G$  приложена постепенно возрастающая сила  $P_1$ . С другой стороны тела на определенном расстоянии установлен упор, который имеет коэффициент жесткости  $C_{ny}$ . Известен требуемый путь перемещения тела  $\Delta l_{ST}$ . Необходимо определить расстояние установки упора от центрируемого изделия  $\Delta l_y$ .

Напишем уравнение произведенных работ при перемещении тела.

где  $A_y$  – работа, затраченная на упругое сжатие упора, Н мм.

Подставим в уравнение (4) значения составляющих

$$\int_0^{\Delta l_{ST}} (P_{max} - C_n \Delta l) d \Delta l - P_0 \cdot l_{ST} - \int_{\Delta l_y}^{\Delta l_{ST}} C_{ny} (\Delta l - \Delta l_y) d \Delta l = 0$$

После решения подинтегральных выражений найдем значение  $\Delta l_y$

$$\Delta l_y = \Delta l_{ST} - \sqrt{\frac{2 \Delta l_{ST} (P_{max} - P_0) - \Delta l_{ST}^2 C_n}{C_{ny}}} \quad (5)$$

Подставив значения  $P_{max}$  и  $P_0$ , получим следующее уравнение:

$$\Delta l_y = \Delta l_{ST} - \sqrt{\frac{2 \Delta l_{ST} (C_n l_n - f_0 G) - \Delta l_{ST}^2 C_n}{C_{ny}}} \quad (6)$$

Проведем исследование уравнения (5). Для этого принимаем: предыдущие данные, использованные для исследования уравнения (2), а также для простоты расчетов  $C_n = C_{ny}$ .

Таблица 2

Результаты расчета значений установки упора ( $\Delta l_y$ ) от изменения необходимого перемещения тела ( $\Delta l_{ST}$ ) и коэффициентов жесткости отжимного устройства и упора ( $C_n, C_{ny}$ )

№ п/п	$\Delta l_{ST}$ , мм	$\Delta l_y = f(C_n)$					$P_{max}$ , кН	$P_0$ , кН
		$C_n = C_{ny}$ , Н/мм						
		$1,5 \times 10^5$	$1 \times 10^5$	$0,6 \times 10^5$	$0,3 \times 10^5$	$0,1 \times 10^5$		
1	0,1	-0,287	-0,38	-0,52	-0,79	-1,45	300	180
2	0,2	-0,329	-0,56	-0,67	-1,05	-1,98	- « -	- « -
3	0,3	-0,324	-0,49	-0,75	-1,22	-2,37	- « -	- « -
4	0,4	-0,29	-0,49	-0,8	-1,34	-2,67	- « -	- « -
5	0,5	-0,24	-0,47	-0,82	-1,44	-2,93	- « -	- « -
6	0,6	-0,17	-0,44	-0,83	-1,51	-3,15	- « -	- « -
7	0,7	-0,09	-0,39	-0,82	-1,56	-3,34	- « -	- « -
8	0,8	0	-0,33	-0,8	-1,6	-3,51	- « -	- « -
9	0,9	+0,11	-0,21	-0,77	-1,63	-3,65	- « -	- « -
10	1,0	+0,23	-0,18	-0,73	-1,65	-3,80	- « -	- « -
11	1,4	+0,87	+0,22	-0,51	-1,64	-4,2	- « -	- « -
12	1,5	+1,35	+0,34	-0,44	-1,62	-4,31	- « -	- « -
13	2,0	-	+1,11	0	-1,46	-4,63	- « -	- « -
14	2,5	-	-	+0,56	-1,21	-4,83	- « -	- « -
15	3,0	-	-	+1,26	-0,87	-4,94	- « -	- « -
16	3,5	-	-	+1,75	-0,47	-4,97	- « -	- « -
17	4,0	-	-	+4,0	0	-4,94	- « -	- « -
18	4,5	-	-	-	+0,53	-4,87	- « -	- « -
19	5,0	-	-	-	+1,68	-4,11	- « -	- « -

$$A_n - A_{p_0} - A_y = 0 \quad (4)$$



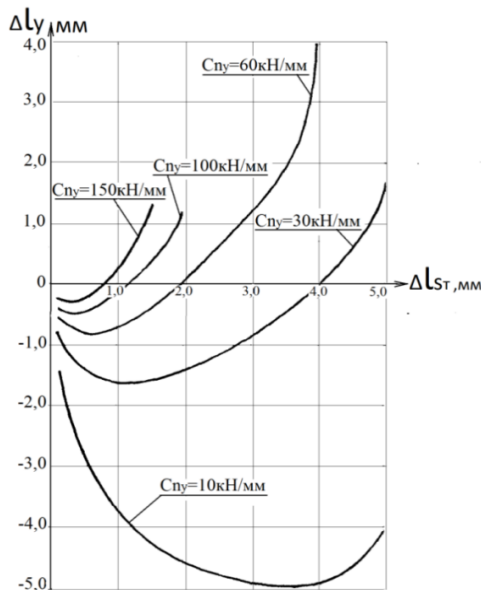


Рисунок 6 – График зависимостей расстояний установки упора  $\Delta L_y$  от значений необходимых величин перемещений и коэффициентов жесткости отжимного устройства и упора

### Заключение

На основании выше изложенного исследования, установленных математических и графических зависимостей можно сделать ряд следующих выводов

1. Обеспечение точного базирования тяжеловесных СМЕ относительно монтажно-

базовых плоскостей судовых помещений является наиболее сложной и ответственной задачей в общем цикле выполнения монтажных операций.

2. При разработке технологических процессов и средств оснащения для обеспечения точного центрирования тяжеловесных СМЕ относительно монтажно-базовых плоскостей судового помещения необходимо при конструкторско-технологической подготовке механомонтажного производства предусматривать применение жестких центрирующих устройств с возможностью контролирования прикладываемых усилий и перемещений.

3. При центрировании тяжеловесных жестких СМЕ целесообразно использовать в качестве отжимных устройств-гидравлические домкраты (см. рис.2) с обеспечением установки ограничительных упоров с противоположной стороны изделия на расчетном расстоянии.

4. Согласно полученному выражению (3) для обеспечения перемещения СМЕ на величины, исчисляемые в десятых долях мм, необходимо использовать жесткие отжимные устройства.

5. Для получения малых (десятые доли миллиметра) контролируемых перемещений СМЕ при обеспечении их точного центрирования, следует осуществлять установку технологических упоров вплотную к конструкции СМЕ с предварительной их упругой деформацией на расчетные значения, определяемые по формулам (5) и (6).

### Литература

1. N.I Gerasimov, I.V. Grachev, D.N. Kanaev. Further advancements and prospects of modular-assembly installation method for nuclear power plants. 9<sup>th</sup> International Confenece NAVY AND SHIPBUILDING NOWADAYS, NSN'2017. June 29-30, 2017, St.Petersburg, Russia, s.255-258.
2. Герасимов Н.И., Грачев И.В. Особенности технологии монтажа ЯЭУ при серийной постройке ледоколов пр. 22220. Труды Российского НТО судостроителей имени ак. А.Н. Крылова «150 лет судостроителей...», т.1, с.20-27, г. Санкт-Петербург, 2016 г.
3. Герасимов Н.И., Грачев И.В. Основные направления дальнейшего развития модульно-агрегатного метода монтажа ЭУ при постройке атомных подводных лодок // Сборник трудов конференции: «Становление и развитие атомного подводного кораблестроения на АО «ПО «Севмаш», 2016г., с.91-96.
4. Герасимов Н.И., Грачев И.В., Долматов М.А., Канаев Д.Н., Лямин П.Л., Михайлов А.О. Основные направления дальнейшего развития модульно-агрегатного метода при проектировании и постройке объектов морской техники // Научно-технический и производственный журнал «Судостроение». №3, 2013г., с.50-53.
5. Калеминцев И.В. Применение полимерных материалов при монтаже зональных блоков на кораблях ВМФ // Сборник трудов конференции: «Становление и развитие атомного подводного кораблестроения на АО «ПО «Севмаш». 2016г., с.147-148.
6. Морозов К.Н., Усманов Д.В. Современный программный комплекс для расчета технологических параметров центровки валопроводов // Научно-технический и производственный журнал «Судостроение». 2013г., с.61-65.
7. Герасимов Н.И., Греков А.П., Канаев Д.Н. Исследование процесса перемещений при центрировании СМЕ в помещениях судов // Научно-производственный сборник «Вестник технологии судостроения и судоремонта». №5, 1999г., с.77-79.
8. Герасимов Н.И. Технология монтажа судового энергетического оборудования // Издательство «Судостроение». ОАО «ЦТСС», 2014г., 622 с.
9. Герасимов Н.И. Особенности технологии выгрузки и погрузки крупногабаритного оборудования при ремонте и модернизации объектов морской техники // Сборник докладов на научно-практической конференции. 18-22 мая 2013г., г. Анапа, с.49-53.

10. Minasyan M.A., Minasyan A.M. Elastic basic communications of the ship diesel power installations. 7<sup>th</sup> International Conference NAVY AND SHIPBUILDING NOWADAYS NSN' 2013. July 4-5, 2013, St.Petersburg, Russia, s.143-149.

#### References

1. N.I Gerasimov, I.V. Grachev, D.N. Kanaev. Further advancements and prospects of modular-assembly installation method for nuclear power plants. 9<sup>th</sup> International Conference NAVY AND SHIPBUILDING NOWADAYS, NSN'2017. June 29-30, 2017, St.Petersburg, Russia, s.255-258.
2. Gerasimov N.I., Grachev I.V. Osobennosti tekhnologii montazha YAEHU pri serijnoj postrojke ledokolov pr. 22220. Trudy Rossijskogo NTO sudostroitelej imeni ak. A.N. Krylova «150 let sudostroitelej...», t.1, s.20-27, c. St.Petersburg, 2016.
3. Gerasimov N.I., Grachev I.V. Osnovnye napravleniya dal'nejshego razvitiya modul'no-agregatnogo metoda montazha EHU pri postrojke atomnyh podvodnyh lodok // Sbornik trudov konferencii: «Stanovlenie i razvitie atomnogo podvodnogo korablestroeniya na AO «PO «Sevmash», 2016g., s.91-96.
4. Gerasimov N.I., Grachev I.V., Dolmatov M.A., Kanaev D.N., Lyamin P.L., Mihajlov A.O. Osnovnye napravleniya dal'nejshego razvitiya modul'no-agregatnogo metoda pri proektirovanii i postrojke ob"ektov morskoy tekhniki // Nauchno-tekhnicheskij i proizvodstvennyj zhurnal «Sudostroenie». №3, 2013, c.50-53.
5. Kalemincev I.V. Primenenie polimernyh materialov pri montazhe zonal'nyh blokov na korablyah VMF // Sbornik trudov konferencii: «Stanovlenie i razvitie atomnogo podvodnogo korablestroeniya na AO «PO «Sevmash». 2016, s.147-148.
6. Morozov K.N., Usmanov D.V. Sovremennyy programmnyj kompleks dlya rascheta tekhnologicheskikh parametrov centrovki valoprovodov // Nauchno-tekhnicheskij i proizvodstvennyj zhurnal «Sudostroenie». 2013g., s.61-65.
7. Gerasimov N.I., Grekov A.P., Kanaev D.N. Issledovanie processa peremeshchenij pri centrirovanii SME v pomeshcheniyah sudov // Nauchno-proizvodstvennyj sbornik «Vestnik tekhnologii sudostroeniya i sudoremonta». №5, 1999g., s.77-79.
8. Gerasimov N.I. Tekhnologiya montazha sudovogo ehnergeticheskogo oborudovaniya // Izdatel'stvo «Sudostroenie». OAO «CTSS», 2014g., 622 s.
9. Gerasimov N.I. Osobennosti tekhnologii vygruzki i pogruzki krupnogabaritnogo oborudovaniya pri remonte i modernizacii ob"ektov morskoy tekhniki // Sbornik dokladov na nauchno-prakticheskoy konferencii. 18-22 maya 2013g, c. Anapa, s.49-53.
10. Minasyan M.A., Minasyan A.M. Elastic basic communications of the ship diesel power installations. 7<sup>th</sup> International Conference NAVY AND SHIPBUILDING NOWADAYS NSN' 2013. July 4-5, 2013, St.Petersburg, Russia, s.143-149.

УДК 629.12

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ К РАСЧЁТУ ОТКЛОНЕНИЙ ТРАСС СУДОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

**Во Чунг Куанг**

аспирант кафедры " Судостроение и энергетические комплексы морской техники "  
Астраханский государственный технический университет  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16  
e-mail: ngocsenqb@gmail.com

**Константин Николаевич Сахно**

Д.т.н., доцент, профессор кафедры "Судостроение и энергетические комплексы морской техники"  
Астраханский государственный технический университет  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16  
e-mail: k.sakhno@mail.ru

### Аннотация

Авторами рассматривается актуальная проблема повышения трассировки трубопроводов судовых систем на стадии проектирования. Представлены пути решения вопроса изготовления и монтажа судовых трубопроводов без снятия размеров по месту. Проведён анализ стандартизованных отклонений, контролируемых при изготовлении труб по чертежам. Рассмотрена возможность применения теории размерных цепей к расчёту суммарных отклонений трасс. Разработано математическое описание для расчета отклонений трасс судовых трубопроводов, возникающих в процессе их изготовления и монтажа. Предлагаемая разработка позволяет на стадии проектирования определять отклонения трасс при монтаже трубопроводов, возникающие при использовании технологии изготовления труб по проектной информации. Применение теории размерных цепей к анализу максимальных суммарных отклонений трасс судовых трубопроводов открывает возможность экспериментального подтверждения математических соотношений и их применения в практических расчётах, и дает возможность обоснования проектной трассировки трубопроводов судовых систем на основе исследований точности изготовления труб с соединениями.

**Ключевые слова:** Размерные цепи, трубопроводы, трассировка, проектирование трубопроводов, изготовление труб, монтаж, судовые системы, сборка, отклонения координатных размеров труб, отклонения трассы, суммарные отклонения.

## APPLICATION OF THE DIMENSIONAL CIRCUITS THEORY ON CALCULATING THE DEFLECTIONS OF SHIP PIPELINES ROUTE

**Vo Trung Quang**

postgraduate student of the department " Shipbuilding and marine power engineering complexes "  
Astrakhan State Technical University,  
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation  
e-mail: ngocsenqb@gmail.com

**Konstantin N. Sakhno**

the associate professor, Dr. Sci. Tech., the professor of the department "Shipbuilding and marine power engineering complexes"  
Astrakhan State Technical University,  
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation  
e-mail: k.sakhno@mail.ru

### Abstract

The authors consider the actual problem to be the increase in tracing pipelines of ship systems at the design stage. The ways of solving the issue of manufacturing and installation of ship pipelines are presented without removing the dimensions in place. The analysis of standardized deviations controlled in the manufacture of pipes according to the drawings is analyzed. The possibility of applying the theory of dimensional circuits to the calculation of total deviations of the paths is considered. A mathematical model has been developed to calculating deviations in the ship pipelines route that arise during their manufacture and installation. The proposed development allows for the design stage to determine the deviations of the pipelines during installation of pipelines, which arise when using the technology of manufacturing pipes according to design information. The application of the theory of dimensional chains to the analysis of the maximum total deviations in the routes of ship pipelines

opens the possibility of experimental confirmation of mathematical relationships and their application in practical calculations, and provides an opportunity to substantiate the design tracing of pipelines of ship systems based on studies of the accuracy of manufacturing pipes with connections.

**Key words:** Dimensional circuits, pipelines, tracing, pipeline design, pipe manufacturing, installation, ship systems, assembly, deviations in the pipe dimensions, deviation of the track, total deviations.

**Введение**

Трубопроводы – составная часть конструкции машин, устройств, аппаратов, систем и сооружений в различных отраслях промышленности.

Технологические трубопроводы являются важнейшей частью не только в судостроении, но и в промышленных объектах нефтяной, химической, пищевой, и металлургической промышленности. Протяжённость труб судовых систем и систем судовых энергетических установок на одном судне может достигать десятков километров [2,7].

С развитием вычислительной техники необходимость создания макетов отпала. Они заменяются виртуальными 3D - моделями. Различные программные комплексы (CADMATIC, CATIA, TRIBON, FORAN,...) осуществляют выпуск документации для формирования корпуса, размещения оборудования, прокладке кабеля и трубопроводных систем.

Эффект от применения этих программных комплексов заключается не только в ускорении и упрощении выпуска и корректировки проектной документации, но и в уверенности, что все изделия и детали, составляющие судно займут своё назначенное программными место, т.к. все программы согласованы между собой.

Пропадает необходимость в унификации конфигураций труб, т.к. расчёт параметров гибки каждой трубы выполняется специальными программами, например: «Ритм-судно».

Однако прорыв в выпуске проектной документации высокой точности не дал желаемого эффекта для изготовления труб по проектной документации без уточнения рассчитанных размеров по месту.

Одной из причин такого результата стало не соблюдение проектантом указанных в ОСТ зазоров [1,8].

В работе [6] была разработана методика анализа и расчетов максимальных отклонений при операции гибки и компенсационных возможностей трубы в зависимости от её конфигурации.

На стадии проектирования проектант должен составлять размерные цепи смещения трассы по каждой координатной оси; рассчитать максимальные смещения (отклонения) трассы от теоретического положения с учётом допуска каждой трубы, сравнить с контролируемыми зазорами между трассами и конструкциями и выдать заключение о достаточности или недостаточности назначаемых зазоров.

В процессе формирования конфигурации трубы на трубогибном станке выполняется несколько операций – это продвижение до начала погиба, непосредственно погиб и

разворот трубы для выполнения последующего погиба в нужной плоскости. Погрешности двух последних операций приводят к угловым отклонениям направлений прямых участков трубы, в том числе и концевых участков. Контроль этих отклонений существующими стандартами не регламентируется.

**Математическое описание для расчета отклонений трасс судовых трубопроводов**

Многие размеры деталей при изготовлении и сборке в задел становятся взаимосвязанными. Размерной цепью называют совокупность размеров, образующих замкнутый контур и определяющих точность взаимного расположения поверхностей одной детали или нескольких деталей в узле [3,9].

Рассмотрим возможность применения теории размерных цепей к расчёту суммарных отклонений трасс.

Как известно, звеньями цепи могут быть как номинальные размеры, так и отклонения. В общем случае, каждый член (трубы) цепи отклонения привязан к осям координат x, y, z.

Отклонение трассы  $\vec{D}_i$  i-го звена состоит из количественной связи звена:

$$\vec{D}_i = f(\vec{d}_1, \vec{d}_2, \vec{d}_3, \dots, \vec{d}_j)(1),$$

где  $\vec{d}_j$  – суммарные отклонения координатных размерных труб после изготовления определяются соотношением:

$$\vec{d}_i = \sum \begin{pmatrix} \sum x \\ \sum y \\ \sum z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_1^{i-1} xc_i + \sum_1^{i-1} xa_i + \sum_1^{i-1} xb_i + xk \\ \sum_1^{i-1} yc_i + \sum_1^{i-1} ya_i + \sum_1^{i-1} yb_i + yk \\ \sum_1^{i-1} zc_i + \sum_1^{i-1} za_i + \sum_1^{i-1} zb_i + zk \end{pmatrix} (2)$$

$xa_i, xb_i, xc_i, ya_i, yb_i, za_i, zb_i, zc_i, xk, yk, zk$

– отклонения под влиянием погрешностей (погиба  $a_i$ , разворота  $b_i$ , продвижения  $c_i$ , резки  $k$ ) по соответствующим координатным направлениям OX, OY, OZ, определяются соотношениями в работе [6].

При проведении размерного анализа в процессе проектирования возникает необходимость учёта не конкретных, а предельных отклонений

$$(\sum x) \max, (\sum y) \max, (\sum z) \max, (xa) \max, (xb) \max, (xc) \max, (ya) \max, (yb) \max, (yc) \max, (za) \max, (zb) \max, (zc) \max, (xk) \max, (yk) \max, (zk) \max$$

Расчёты размерных цепей производятся, например: по методу максимума–минимума, когда учитываются только предельные отклонения составляющих звеньев и их самое неблагоприятное сочетание, или вероятностным

методом, при котором учитываются законы рассеивания размеров составляющих звеньев и их случайный характер сочетания при сборке.

В данной работе для расчёта отклонений трассы принят метод максимума–минимума. Сущность метода заключается в том, что требуемая точность замыкающего звена размерной цепи достигается во всех случаях её реализации при включении в неё составляющих звеньев без выбора, подбора или их изменения. Значения составляющих звеньев можно учесть в уравнении размерной цепи с помощью передаточных отношений. Это даёт возможность записать уравнение размерной цепи в общем виде:

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i \bar{d}_i \quad (3)$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots, m$  - порядковый номер составляющего звена;

$\varepsilon_i$  - передаточное отношение  $i$ -го составляющего звена;

для увеличивающих составляющих звеньев

$\varepsilon_i = 1$ , а для уменьшающих составляющих звеньев  $\varepsilon_i = -1$ .

При расчётах максимальных отклонений трассы могут быть использованы два метода: расчёт на максимум – минимум и вероятностный расчёт. Метод расчёта на максимум – минимум учитывает только предельные отклонения звеньев размерной цепи и самые неблагоприятные их сочетания.

Для размерных цепей с числом составляющих звеньев  $m$ , можно записать формулу в общем виде:  $\bar{D} = \sum_{i=1}^m |\varepsilon_i| \bar{d}_i$  (4)

При суммировании отклонений трасс учитывают абсолютные значения передаточных отношений, поскольку значения отклонений трасс всегда положительны, т.е.  $|\varepsilon_i| = 1$ . Формула (4)

приобретает вид:  $\bar{D} = \sum_{i=1}^m \bar{d}_i$  (5)

Таким образом, отклонения трассы замыкающего звена плоской размерной цепи звеньями равно сумме абсолютных значений отклонений всех составляющих звеньев, т.е. отклонение трассы при проведении размерного анализа в процессе проектирования равно сумме абсолютных значений отклонений координатных размеров трубы.

$$D = \sum_{i=1}^m |d_i| \quad (6)$$

или

$$D \begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^m |dx_i| \\ \sum_{i=1}^m |dy_i| \\ \sum_{i=1}^m |dz_i| \end{pmatrix} \quad (7),$$

где  $D_x, D_y, D_z$   $D = \sum_{i=1}^m |d_i|$  - это

максимальные отклонения трассы по соответствующим координатным направлениям OX, OY, OZ.

Кроме отклонений трассы возникающих от неточности изготовления труб, отклонения будут зависеть от жёстких соединений начала монтажа трасс. Жёсткими соединениями кроме изделий, не входящих в состав трубопровода (оборудование, переборочные стаканы и т.д.), являются и отрезки (ответвления) других трасс трубопроводов.

Для более точного учёта этих отклонений вводим понятие – сеть трубопроводов (трасс).

Сеть трубопроводов – это группа трасс, соединённых между собой с помощью деталей ответвлений: отрезков, ответвительных штуцеров и приварышей – в дальнейшем отрезки (рис.1).

Необходимость рассмотрения отклонений трассы в составе сети, объясняется тем, что труба, которой принадлежит отрезок, имеет отклонения, возникшие при её монтаже, и которые повлияют на отклонения трассы, начинающейся с этого отрезка.

Отрезок, для начинающейся от него трассы, является жёстким соединением. Рассчитав отклонение трассы, отрезок которой будет жёстким соединением для другой трассы, необходимо добавить данное отклонение в расчёт отклонения трассы, начинающейся с этого отрезка. Это позволит получить отклонения трасс, начинающихся с отрезка, с учётом отклонений трасс, которым эти отрезки принадлежат.

Рассмотрим трассу A, состоящую из  $m$  труб, начинающуюся и заканчивающаяся жёсткими соединениями, и трассу B состоящую из  $n$  труб, начинающуюся с отрезка  $k$  ( $1 \leq k \leq m$ ),

который входит в состав трассы A.

Отклонения конца трассы A по направлению OX, OY, OZ определяются по формуле:

$$D_x(A) = \sum_{i=1}^m |dx_i(A)| = |dx_1(A)| + |dx_2(A)| + \dots + |dx_k(A)| + \dots + |dx_m(A)| \quad (8)$$

$$D_y(A) = \sum_{i=1}^m |dy_i(A)| = |dy_1(A)| + |dy_2(A)| + \dots + |dy_k(A)| + \dots + |d(A)y_m| \quad (9)$$

$$D_z(A) = \left| \sum_{i=1}^m dz_i(A) \right| = |dz_1(A)| + |dz_2(A)| + \dots + |dz_k(A)| + \dots + |dz_m(A)| \quad (10)$$



Отклонения конца трассы  $B$  по направлению  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  определяются по формуле:

$$D_x(B) = \sum_{i=1}^k |dx_i(A)| + \sum_{i=1}^n |dx_i(B)|$$

$$= |dx_1(A)| + |dx_2(A)| + \dots + |dx_k(A)|$$

$$+ |dx_1(B)| + |dx_2(B)| + \dots + |dx_n(B)| \quad (11)$$

$$D_y(B) = \sum_{i=1}^k |dy_i(A)| + \sum_{i=1}^n |dy_i(B)|$$

$$= |dy_1(A)| + |dy_2(A)| + \dots + |dy_k(A)|$$

$$+ |dy_1(B)| + |dy_2(B)| + \dots + |dy_n(B)| \quad (12)$$

$$D_z(B) = \sum_{i=1}^k |dz_i(A)| + \sum_{i=1}^n |dz_i(B)|$$

$$= |dz_1(A)| + |dz_2(A)| + \dots + |dz_k(A)|$$

$$+ |dz_1(B)| + |dz_2(B)| + \dots + |dz_n(B)| \quad (13)$$

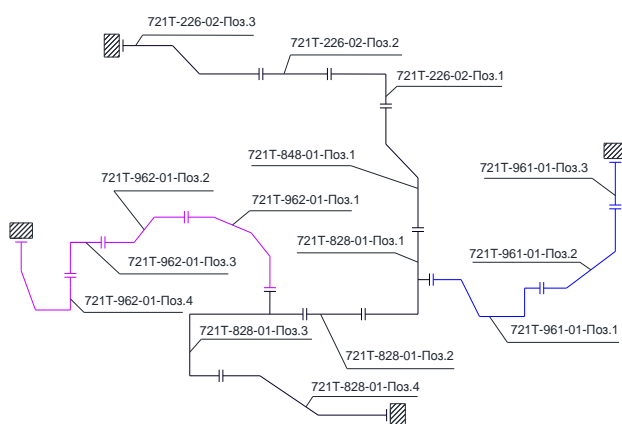


Рисунок 1 – Сеть трубопроводов

Сеть трубопроводов (рис.1) состоит из 3-х трасс:

- трасса №1 составляется из 8 труб: 1) 721Т-226-02-Поз.3; 2) 721Т-226-02-Поз.2; 3) 721Т-226-02-Поз.1; 4) 721Т-848-01-Поз.1; 5) 721Т-828-01-Поз.1; 6) 721Т-828-01-Поз.2; 7) 721Т-828-01-Поз.3; 8) 721Т-828-01-Поз.4. Данная трасса не начинается с отрезка;

- трасса №2 составляется из 4 труб: 1) 721Т-962-01-Поз.1; 2) 721Т-962-01-Поз.2; 3) 721Т-962-01-Поз.3; 4) 721Т-962-01-Поз.4. Трасса начинается с отрезка 721Т-828-01-Поз.3;

- трасса №3 составляется из 3 труб: 1) 721Т-961-01-Поз.1; 2) 721Т-961-01-Поз.2; 3) 721Т-961-

01-Поз.3. Трасса начинается с отрезка 721Т-828-01-Поз.1.

Допустимые отклонения трасс, которые необходимо учитывать проектанту, регламентированы в РД.50005.5Р-93 [5].

Процесс расчёта отклонений должен быть максимально автоматизирован. Интерактивные действия проектанта заключаются в вводе информации о составе данной трассы (позиция труб), а также – последовательности их монтажа (первая, вторая и т.д.). Дополнительно необходимо утвердить: начинается ли трасса с отрезка. Проектант может работать как со всей трассой, так и с её частями, выясняя величины отклонения трассы в интересующем его районе проведения трассировки.

Для проверки совпадения указанных требований РД 50005.5Р-93 проектант должен составить размерные цепи отклонений трассы по каждой координатной оси по допускаемым отклонениям труб. В этих размерных цепях, отклонения каждой трубы составят  $\pm 10$  мм или  $\pm 15$  мм, в зависимости от диаметра труб [4]. Зазоры, регламентируемые РД.50005.5Р-93: 30мм – между трубами и конструкциями; 40 мм – между трассами трубопроводов предусмотрены для компенсации возможных отклонений трасс в зависимости от неточности изготовления труб.

Если расчетные отклонения трассы в пределах контролируемого зазора, то обеспечивается изготовление труб трассы заранее, в задел.

### Заключение

Применение теории размерных цепей к анализу максимальных суммарных отклонений трасс судовых трубопроводов открывает возможность экспериментального подтверждения математических соотношений и их применения в практических расчётах, и дает возможность обоснования проектной трассировки трубопроводов судовых систем на основе исследований точности изготовления труб с соединениями.

### Литература

1. Во, Ч.К. Разработка методики обеспечения достоверной трассировки трубопроводов, учитывающей допуски конструктивных размеров труб, возникающих при их изготовлении по проектным чертежам / Ч.К. Во, К.Н. Сахно, Ж.В. Нго // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. - Астрахань, 2017. –№4. – С. 21-28. ISSN 2073-1574.
2. Дьяков, А.С. Развитие технологий изготовления трубопроводов в рамках стратегии импортозамещения / А.С. Дьяков, К.Н. Сахно // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2015. – Т. 13. – С. 3516–3520. [http://e-koncept.ru/2015/85704.htm]
3. ОСТ 3-3781-85. Цепи размерно-точностные. Методы расчета на ЭВМ.
4. ОСТ 5.95057-90. Системы судовые и системы судовых энергетических установок. Типовой технологический процесс изготовления и монтажа трубопроводов. — РТП НПО «Ритм». — 207 с.

5. РД 5Р.0005-93. Системы судовые и системы судовых энергетических установок. Требования к проектированию, изготовлению и монтажу труб по эскизам и чертежам с координатами трасс трубопроводов. – СПб.: ЦНИИТС.
6. Сахно, К.Н. Научные основы повышения технологичности трубопроводов судовых систем на стадии проектирования: дис. ... д-ра техн. наук / К.Н. Сахно. Астрахань, 2012. 353 с.
7. Сахно, К.Н. Совершенствование технологии изготовления трубопроводов по проектной информации при использовании приварных соединений труб. [Текст] / К.Н. Сахно, А.С. Дьяков, Ч.К. Во // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова - Санкт-Петербург, 2016. – №1(35) – С. 91-98.
8. Сахно, К.Н. Технология изготовления и монтажа трасс трубопроводов по проектной информации / К.Н. Сахно, Во Куанг Чунг, Нго Вьет Жа // Естественные и технические науки. Серия: технические науки. - Изд. «Спутник+» – 2017. – № 2 (104). – С 103–108.
9. Урывский, Ф.П. Методические указания. Размерные цепи / Ф. П. Урывский, Б. Н. Уланов, В. Н.Трусов. – Куйбышев, 1982. –16с.

#### References

1. Vo, Ch.K. Razrabotka metodiki obespechenija dostovernoj trassirovki truboprovodov, uchityvajushhej dopuski konstruktivnyh razmerov trub, vznikajushhih pri ih izgotovlenii po proektnym chertezham / Ch.K. Vo, K.N. Sahno, Zh.V. Ngo // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Morskaja tehnika i tehnologija. - Astrahan', 2017. –№4. – S. 21-28. ISSN 2073-1574.
2. D'jakov, A.S. Razvitie tehnologij izgotovlenija truboprovodov v ramkah strategii importozameshhenija / A.S. D'jakov, K.N. Sahno // Nauchno-metodičeskij jelektronnyj zhurnal «Koncept». – 2015. – Т. 13. – S. 3516–3520. [<http://e-koncept.ru/2015/85704.htm>]
3. OST 3-3781-85. Cepi razmerno-tochnostnye. Metody rascheta na JeVM.
4. OST 5.95057-90. Sistemy sudovye i sistemy sudovyh jenergetičeskix ustanovok. Tipovoj tehnologičeskij process izgotovlenija i montazha truboprovodov. — RTP NPO «Ritm». — 207 s.
5. RD 5R.0005-93. Sistemy sudovye i sistemy sudovyh jenergetičeskix ustanovok. Trebovanija k proektirovaniju, izgotovleniju i montazhu trub po jeskizam i chertezham s koordinatami trass truboprovodov. – SPb.: CNIITS.
6. Sahno, K.N. Nauchnye osnovy povyšhenija tehnologičnosti truboprovodov sudovyh sistem na stadii proektirovanija: dis. ... d-ra tehn. nauk / K.N. Sahno. Astrahan', 2012. 353 s.
7. Sahno, K.N. Sovershenstvovanie tehnologij izgotovlenija truboprovodov po proektnoj informacii pri ispol'zovanii privarnykh soedinenij trub. [Tekst] / K.N. Sahno, A.S. D'jakov, Ch.K. Vo // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rečnogo flota imeni admirala S.O. Makarova - Sankt-Peterburg, 2016. – №1(35) – S. 91-98.
8. Sahno, K.N. Tehnologija izgotovlenija i montazha trass truboprovodov po proektnoj informacii / K.N. Sahno, Vo Kuang Chung, Ngo V'et Zha // Estestvennye i tehničeskije nauki. Serija: tehničeskije nauki. - Izd. «Sputnik+» – 2017. – № 2 (104). – S 103–108.
9. Uryvskij, F.P. Metodičeskije ukazanija. Razmernye cepi / F. P. Uryvskij, B. N. Ulanov, V. N.Trusov. – Kujbyshev, 1982. –16s.

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

УДК 629.12.001.2

### **К ВОПРОСУ ВЫБОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ**

**Владимир Георгиевич Иванов**

заместитель генерального директора по разработке новой техники  
«Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт  
электромашиностроения (АО «ВНИТИ ЭМ»),  
196105, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 2  
тел. (812)369-93-61, факс: (812)369-91-09; e-mail: [office@vnitiem.ru](mailto:office@vnitiem.ru) web: [www.vnitiem.ru](http://www.vnitiem.ru)

**Илья Владимирович Степанов**

кандидат технических наук, ведущий специалист отдела научных разработок  
«Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт  
электромашиностроения (АО «ВНИТИ ЭМ»),  
196105, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 2  
тел. (812)369-93-61, факс: (812)369-91-09; e-mail: [office@vnitiem.ru](mailto:office@vnitiem.ru) web: [www.vnitiem.ru](http://www.vnitiem.ru)

**Александр Альбертович Томов**

кандидат технических наук, начальник отдела расчетов электрических машин  
«Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт  
электромашиностроения (АО «ВНИТИ ЭМ»),  
196105, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 2  
тел. (812)369-93-61, факс: (812)369-91-09; e-mail: [office@vnitiem.ru](mailto:office@vnitiem.ru) web: [www.vnitiem.ru](http://www.vnitiem.ru)

#### **Аннотация**

Для освоения мирового океана все шире применяются необитаемые подводные аппараты с гребными электроприводами.

Необитаемые подводные аппараты можно отнести к классу «подводных роботов» с дистанционным управлением. Траектория движения таких аппаратов реализуется набором автоматизированных электроприводов с изменяемым вектором тяги на базе бесконтактных регулируемых электродвигателей и полупроводниковых преобразователей с микропроцессорным управлением в цепях их обмоток.

В статье рассматриваются достоинства и недостатки высокооборотных гребных электроприводов малой и средней мощности (до 100 кВт) на базе бесконтактных регулируемых электродвигателей синхронного типа с возбуждением от постоянных магнитов. Приведено обоснование выбора рациональных соотношений габаритных размеров гребных электродвигателей ( $L/D$ ) и числа пар полюсов ротора с целью снижения массы активных материалов электрической машины при заданной величине полезной мощности. Приведены диаграммы зависимостей значений суммарных масс активных материалов гребного электродвигателя и редуктора от частоты вращения электродвигателя для заданных частот вращения гребного винта. Приведены результаты разработки, изготовления и экспериментальных исследований опытного образца гребного электродвигателя мощностью 16 кВт с частотой вращения 24500 об/мин. Результаты верификации расчетных значений параметров и рабочих свойств опытного образца ГЭД, показывают высокую сходимость расчетных и экспериментальных результатов.

**Ключевые слова:** высокооборотный гребной электропривод, бесконтактный регулируемый электродвигатель, рациональное соотношение габаритных размеров, частота вращения гребного винта, изменяемый вектор тяги.

### **AN ISSUE OF SELECTING ELECTRIC MOTORS FOR ROWING DRIVES OF UNMANNED UNDERSEA VEHICLES**

**Vladimir G. Ivanov**

the vice-director in developing novel techniques «VNITI EM»  
All-russian research design and technological institute of electrical engineering

**Ilya V. Stepanov**

Candidate of Engineering Sciences, head specialist of scientific developing division  
All-russian research design and technological institute of electrical engineering

**Aleksander A. Tomov**

Candidate of Engineering Sciences, head of electric motors developing division  
All-russian research design and technological institute of electrical engineering  
2, Blagodatnaya Str., St.Petersburg, 198196 Russia  
e-mail: office@vnitiem.ru tel: (812) 606-69-59

**Abstract**

Unmanned undersea vehicles with rowing drives are increasingly being applied for development of oceans and seas.

Unmanned undersea vehicles are possible to classify as remote-controlled «undersea robots». Trajectory of such vehicles movement is set by suite of automated drives with a variable thrust vector based on contactless adjustable electric motors and *semiconductor transformers* with a microprocessor control in winding chains.

This paper explores pros and cons of high-speed rowing low and mean power electric drives (up to 100 kW), based on contactless regulated electric motors synchronous permanent magnet type. It describes the justification of choice an appropriate dimension ratios of rowing electric motors (L/D) and rotor pole pairs in order to reduce mass of active materials of electric motor with default value of net power. The following charts of total active material mass values of rowing electric motor and gear on electric motor speed for given speeds of rowing propeller are shown. The results of developing, making and experimental studies of 16kW, 24500 rpm rowing electric motor prototype are given. The verification results of parametric values and properties of rowing electric motor prototype show high precision of calculated and experimental results.

**Key words:** high-speed rowing drive, contactless fitting electric motor, appropriate dimension ratio, speed of rowing propeller, variable thrust vector

**Введение**

Для освоения мирового океана все шире применяются необитаемые подводные аппараты (НПА) с гребными электроприводами [1,2].

НПА можно отнести к классу «подводных роботов» или «подводных дронов» с дистанционным управлением. Траектория движения таких аппаратов реализуется набором автоматизированных электроприводов с изменяемым вектором тяги на базе бесконтактных регулируемых электродвигателей и полупроводниковых преобразователей с микропроцессорным управлением в цепях их обмоток.

В зависимости от назначения и компоновочных решений гребные электродвигатели (ГЭД) могут размещаться как внутри НПА, так и за его пределами, в водной среде, что оказывает существенное влияние на предъявляемые к ним требования.

При внутриобъектовом расположении ГЭД требования стойкости к воздействию окружающей среды в большинстве случаев близки к нормальным при атмосферном давлении и положительной температуре воздуха.

При забортном расположении ГЭД на них действует давление агрессивной окружающей морской воды с температурой близкой к 0°C. Для работы в таких условиях в последнее время разрабатывается класс так называемых «погружных» электрических машин с компенсатором давления окружающей среды. [3]

**1. Выбор массо-габаритных характеристик**

Для двух типов рассматриваемых ГЭД неизменным является требование достижения минимальных удельных массо-габаритных значений на единицу мощности. При заданной мощности на валу электродвигателя  $P$ , определяемую как произведение угловой частоты вращения  $\Omega$  на момент на валу  $M$

$$P = \Omega \cdot M \quad (1)$$

наиболее эффективным способом достижения этого требования является повышение номинальной частоты вращения ГЭД. Действительно, из теории электрических машин известно, что момент на валу электрической машины пропорционален произведению [4]

$$M \equiv I_a \cdot \Phi \quad (2)$$

где два сомножителя ( $I_a$  – ток якоря,  $\Phi$  – основной поток) в правой части выражения (2) однозначно определяют объемы и массы активных материалов: «меди» обмотки и «стали» магнитопровода, из чего следует, что уменьшение момента на валу электрической машины при сохранении полезной мощности возможно за счет повышения номинальной частоты вращения [5,6].

Наглядная иллюстрация эффективности снижения массо-габаритных показателей гребного электродвигателя мощностью 16 кВт представлена на диаграмме рисунок 1, полученной расчетным путем с использованием универсальной программы расчета электрических машин синхронного типа с возбуждением от постоянных магнитов [7].

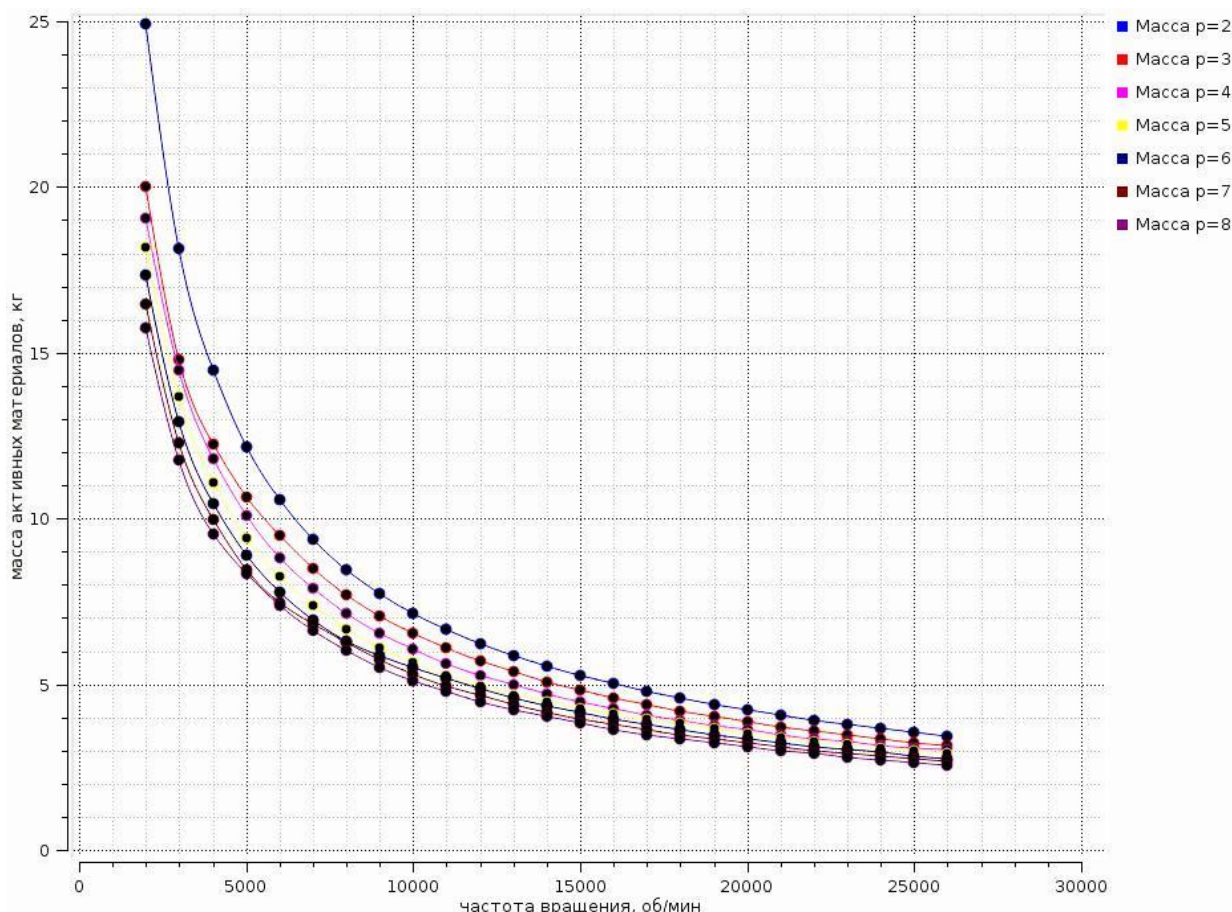


Рис. 1. Зависимость массы активных материалов от частоты вращения

**2. Особенности ограничения максимальной частоты вращения**

Пользуясь диаграммой нетрудно выбрать зону предпочтительных значений частот вращения электродвигателя при эффективном снижении массы электродвигателя. Ограничителями максимальной частоты вращения являются:

- температура активного ядра;
- предельные характеристики подшипников,
- аэродинамические потери,
- частота тока в обмотке якоря,
- механическая прочность конструкции ротора и его узлов (обмотки или постоянных магнитов, бандажа и пр.).

Учитывая особенности характеристик гребных винтов, связанные с ограничением их рабочих частот вращения [8,9], предпочтительные

частоты вращения ГЭД могут быть реализованы только при использовании редуктора. На диаграмме рисунок 2 представлена зависимость массы редуктора от частоты вращения двигателя [10,11].

Таблица 1 наглядно демонстрирует, что суммарная масса редуктора и ГЭД всегда значительно ниже массы активных материалов ГЭД с номинальной (расчетной) частотой вращения равной частоте вращения гребного винта. В таблице 1 и на диаграмме рис. 3 приведены суммарные значения масс гребного привода в диапазоне от безредукторного варианта до варианта привода с редуктором при оптимальном значении частоты вращения ГЭД обеспечивающем минимальное значение массы активных материалов двигателя.

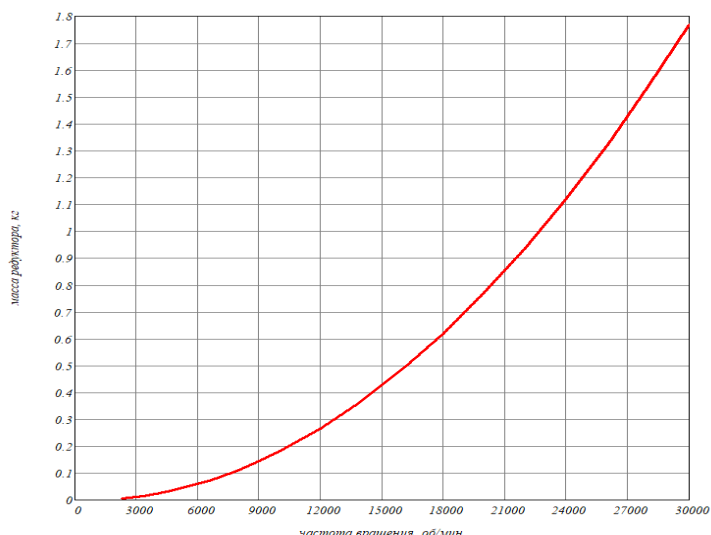


Рис. 2. Зависимость массы редуктора от частоты вращения двигателя

Таблица 1  
Суммарная масса электродвигателя и редуктора

Частота вращения гребного винта	Номинальная частота вращения двигателя	Коэффициент редукции	Масса активных материалов	Масса редуктора	Масса активных материалов и редуктора
об/мин	об/мин		кг	кг	кг
2000	2000	1	24,5	0	24,5
	4000	2	14,5	0,2	14,7
	8500	4	8,5	0,4	8,9
	12000	6	6,2	0,6	6,8
	24500	12	3,65	1,15	4,8

В таблице 2 и на диаграмме рис.4 приведены сравнительные характеристики вариантов расчета ГЭД мощностью 16 кВт при различных соотношениях активной длины  $L_a$  к наружному диаметру якоря  $D_a$  при номинальной частоте вращения.

Диаграмма свидетельствует о наличии экстремумов в кривых  $G_{акт} = f(L_a / D_a)$  при выбранных значениях пар полюсов машины. Используя диаграммы на рис. 1 – 3 для проектируемого ГЭД масса гребного электродвигателя с редуктором может быть снижена в 6,7 раза по сравнению с массой ГЭД без редуктора при заданной частоте вращения гребного винта.

К недостаткам, связанным с наличием редуктора следует отнести:

- повышенные значения амплитуд вибраций и шумов в широком диапазоне частот от единиц Гц до десятков кГц;
- снижение надежности и срока службы привода;
- снижение КПД;
- дополнительное тепловыделение, при внутриобъектовом расположении ГЭД;
- разработка дополнительных мероприятий по обеспечению надежной работы редуктора при заборном расположении ГЭД.

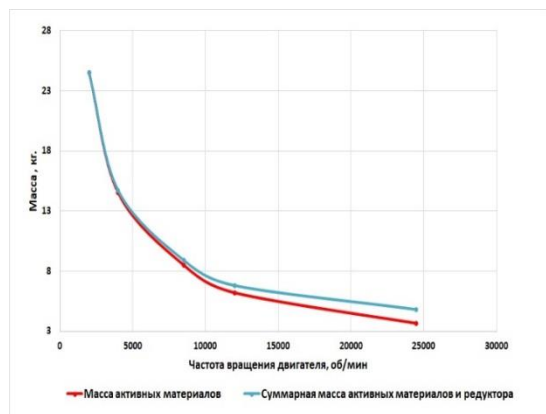


Рис. 3. Зависимость суммарной массы ГЭД и редуктора от частоты вращения вала на входе редуктора



Таблица 2

**Масса активных материалов в зависимости от отношения L/D**

частота вращения ротора ЭД	мощность на валу	диаметр рашточки $D_a$	длина пакета $L_a$	отношение $L_a/D_a$	масса активных материалов
об/мин	кВт	мм	мм	-	кг
24500	16	98	24	0,25	4,0
		82	35	0,425	3,76
		66	54	0,825	3,64
		62	62	1	3,67
		57	72	1,25	3,73
		54	80	1,5	3,8
		49	98	2	3,9

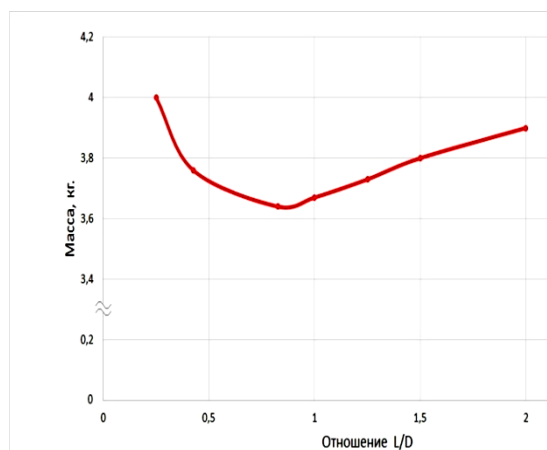


Рис. 4. Зависимость массы активных материалов от отношения  $L_a/D_a$

С использованием, описанных в статье подходов по созданию высокооборотных ГЭД с рациональными массо-габаритными показателями в АО «ВНИТИ ЭМ» осуществлена разработка, изготовление и проведены экспериментальные исследования опытного образца гребного электродвигателя на базе бесконтактной электрической машины синхронного типа с возбуждением от постоянных магнитов мощностью 16 кВт с частотой вращения 24500 об/мин. Основные технические данные приведены в таблице 3, характеристика ГЭД показана на рис. 5.

ГЭД выполнен по схеме «вентильного электродвигателя» с обратной связью по положению ротора [12]. Переключение обмоток

осуществляется силовым транзисторным преобразователем с микропроцессорной системой управления по сигналам датчика положения ротора. Электрическая схема ГЭД приведена на рис. 6.

Таблица 3

**Основные технические данные электродвигателя**

Наименование	Ед. измерен.	Расчетные	Экспериментальные
Номинальная мощность	кВт	16	16
Частота вращения	об/мин	24500	24300
номинальный момент	Н м	6,24	6,29
КПД		95	93
коэффициент мощности		0,98	0,97
напряжение	В	109	112
ток	А	89	93

Для исследования опытного образца ГЭД в АО «ВНИТИ ЭМ» создана экспериментальная установка на базе двух однопольных электрических машин с полупроводниковыми преобразователями, позволяющих рекуперировать энергию нагрузки в питающую сеть двигателя.

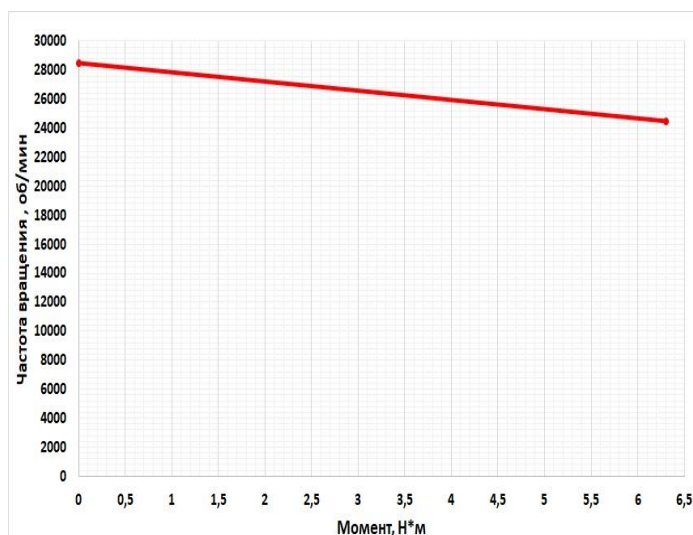
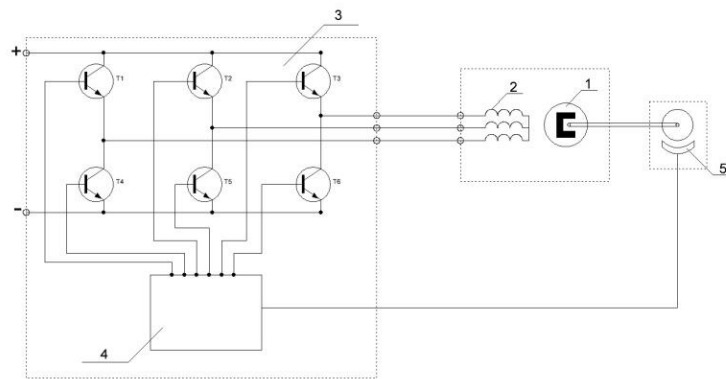


Рис. 5. Экспериментальная внешняя характеристика ГЭД



1 – ротор СМ с постоянными магнитами, 2 – обмотка якоря, 3 – силовой транзисторный преобразователь, 4 – микропроцессорная система управления, 5 – датчик положения ротора

Рис. 6. Электрическая схема ГЭД

### Заключение

1. Разработка высокооборотных гребных электродвигателей с редуктором позволяет снизить массо-габаритные показатели в несколько раз по сравнению с массой ГЭД без редуктора при заданной частоте вращения гребного винта, что актуально при создании нового класса подводных роботов, необходимых для освоения морского и океанского шельфа.

2. Программный комплекс, применяемый в АО «ВНИТИ ЭМ» для проектирования электрических машин переменного тока с возбуждением от постоянных магнитов позволяет с высокой точностью производить электромагнитный расчет и определять параметры электрической машины по заданным исходным данным. Основу методики выбора исходных данных для проектирования гребных электродвигателей с минимальными массо-габаритными показателями составляет обработка результатов электромагнитного расчета методом последовательного приближения.

3. В АО «ВНИТИ ЭМ» осуществлена разработка, изготовление и проведены экспериментальные исследования опытного образца гребного электродвигателя на базе бесконтактной электрической машины синхронного типа с возбуждением от постоянных магнитов. Получены расчетные и экспериментальные характеристики гребного электродвигателя.

4. Верификация параметров и рабочих свойств регулируемого гребного электродвигателя мощностью 16 кВт, при номинальной частоте вращения 24 500 об/мин., показывает сходимость расчетных и экспериментальных результатов в пределах 5%.

5. Устранение указанных в статье недостатков, связанных с применением в гребном электроприводе редуктора, в том числе компенсация источников вибраций и шума, повышение КПД и надежности, требует проведения дополнительных расчетных и экспериментальных исследований.

### Литература

1. Войтов Д.В. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты. М.: Моркнига, 2012. 506 с.
2. Необитаемые подводные аппараты и гидроакустические системы // Каталог продукции ОАО ТЕТИС ПРО. Москва, 2014.
3. Ветехин В.И. Новое поколение электрических машин для работы в жидких агрессивных средах и электроприводах подводных объектов. М.: Полтораки, 2010. 210 с.
4. Важнов В.И. Электрические машины. Учебник для вузов. Ленинград: Энергия, 1969. 768 с.
5. Шаров В.С. Сверхвысокоскоростные асинхронные электродвигатели. Госэнергоиздат, Л.: 1963. 288 с.
6. Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. Л.: Энергия, 1974. 504 с.
7. Томов А.А. Анализ конструкций магнитных систем с постоянными магнитами. Машиностроение и автоматизация производства. Межвузовский сборник, выпуск 21. Санкт-Петербург: СЗПИ, 2000. С.108-120.
8. Кацман Ф.М., Дорогостайский Д. В. Теория судна и движители: Учебник. Л.: Судостроение, 1979. 280 с.
9. Попов С.В., Гузанов Н.П., Матвиенко С.И. Проблемы проектирования погружных электродвигателей открытого типа. Судостроение: 2009. №1. С. 35, 36.
10. Руденко Н.Ф. Планетарные передачи. Теория, применение, расчет и проектирование. М.: 1947. 756 с.
11. Балашов Б.А., Гальпер Р.Р., Гаркави Л.М. и др. Редукторы энергетических машин. Справочник. Л.: Машиностроение. 1985. 232 с.
12. Овчинников И.Е. Теория вентильных электродвигателей. Л.: Наука, 1985. 336 с.

## References

1. Voitov D.V. Telepravliaemye neobitaemye podvodnyie apparaty. M.: Morkniga, 2012. 506 p.
2. Neobitaemye podvodnyie apparaty i gidroakkusticheskiye sistemy. Katalog produktsii "TETIS PRO", Moskva, 2014.
3. Vetokhin V.I. Novoye pokoleniie elektricheskikh mashin dlia raboty v zhidkikh agressivnykh sredakh i elektroprivodakh podvodnykh ob'ektov. M.: Poltorak, 2010. 210 p.
4. Vazhnov V.I. Elektricheskie mashiny. Uchebnyk dlia vuzov. Leningrad: Energiia, 1969. 768 p.
5. Sharov V.S. Sverhvysookorostnyie asinhronnyie electrodvigateli. Gosenergoizdat, L.: 1963. 288 p.
6. Dombrovskiy V.V., Khutoretskiy G.M. Osnovy proektirovaniia elektricheskikh mashin peremennogo toka. L.: Energiia, 1974. 504 p.
7. Tomov A.A. Analiz konstruktsiy magnitnykh system s postoyannymi magnitami. Mashinostroeniie i avtomatizatsiia proizvodstva. Mezhvuzovskiy sbornik, vypusk 21. Sankt-Peterburg: SZPI, 2000. p. 108-120.
8. Katsman F.M., Dorogostayskiy D.V. Teoriia sudna i dvizhitely: Uchebnyk. L.: Sudostroeniie, 1979. 280 p.
9. Popov S.V. Guzanov N.P., Matvienko S.I. Problemy proektirovaniia pogruznykh electrodvigatelei otkrytogo tipa. Sudostroeniie: 2009. №1. p. 35, 36.
10. Rudenko N.F. Planetarnye peredachi. Teoriia, primeneniie, raschet i proektirovaniie. M.: 1947. 756 p.
11. Balashov B.A., Galper R.R., Garkavi L.M. i dr. Redutory energeticheskikh mashyn. Spravochnik. L.: Mashinostroeniie. 1985. 232 p.
12. Ovchinnikov I.E. Teoriia ventilnykh electrodvigatelei. L.: Nauka, 1985. 336 p.

УДК 621.43

## АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРУТИЛЬНО-КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

**Сергей Павлович Глушков**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры  
«Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин»  
Сибирский государственный университет путей сообщения  
630049, Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191  
тел. 8-9139-251-562; e-mail: vkplus2011@yandex.ru

**Сергей Сергеевич Глушков**

кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин»  
Сибирский государственный университет путей сообщения  
630049, Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191  
тел. 8-9139-133-913; e-mail: rcpl@ngs.ru

**Виктор Иванович Кочергин**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры  
«Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин»  
Сибирский государственный университет путей сообщения  
630049, Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191  
тел. 8-9139-876-380; e-mail: vkplus2011@yandex.ru

**Борис Олегович Лебедев**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры  
«Судовые энергетические установки»  
Сибирский государственный университет водного транспорта  
630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33  
тел. 8-91391-133-913; e-mail: lebedevbo@list.ru

### Аннотация

Динамические характеристики двигателя внутреннего сгорания в целом и его отдельных элементов оказывают существенное влияние на внешние и внутренние показатели функционирования энергетической установки, особенно с учетом преобладания неустановившихся режимов работы. В связи с этим, необходимо развитие технологий определения параметров неравномерности вращения в реальном времени в течение всего периода эксплуатации судовой энергетической установки.

В работе приведены теоретические предпосылки и практические результаты метода анализа свободных и вынужденных крутильных колебаний на основе замены многомассовой модели валовой линии на дискретную. Приведены выражения, описывающие характер изменения вынужденных колебаний с учетом матрицы возмущающих моментов. Измерение амплитуд колебаний дает возможность определять параметры передаваемого крутящего момента, оценить возможность возникновения резонансных явлений и техническое состояние валовых линий.

Представлена линия тренда линейной регрессии деградации технического состояния элементов валовых линий, позволяющая определять зоны удовлетворительного и неудовлетворительного технического состояния энергетической установки, и практические результаты исследований крутильных колебаний судовых валопроводов с использованием автоматизированного вычислительного комплекса. Торсионирование с использованием предлагаемого метода исследования неустановившихся режимов работы может быть использовано для определения крутящего момента и мощности двигателей непосредственно в эксплуатационных условиях, в том числе, с применением для обработки и анализа результатов измерений перспективных методов вейвлет-анализа.

**Ключевые слова:** крутильные колебания, крутящий момент, резонанс, вейвлет-анализ

## ANALYSIS OF DYNAMIC CHARACTERISTICS TORSIONAL AND OSCILLATORY SYSTEMS OF SHIP POWER PROPULSION PLANTS

**Sergei P. Glushkov**

Professor, Dr. Sci. Tech.,  
Professor of Department of technology of transport  
mechanical engineering and operation of cars  
Siberian Transport University  
191, D. Kovalchuk str., Novosibirsk 630049, Russian Federation  
e-mail: vkplus2011@yandex.ru

**Sergei S. Glushkov**

Ph. Dr. Sci. Tech.,  
Associate professor of Department of technology of transport  
mechanical engineering and operation of cars  
Siberian Transport University  
191, D. Kovalchuk str., Novosibirsk 630049, Russian Federation  
e-mail: rcpl@ngs.ru

**Victor I. Kochergin**

Associate professor, Ph. Dr. Sci. Tech.,  
Associate professor of Department of technology of transport  
mechanical engineering and operation of cars  
Siberian Transport University  
191, D. Kovalchuk str., Novosibirsk 630049, Russian Federation  
e-mail: rcpl@ngs.ru

**Boris O. Lebedev**

Professor, Dr. Sci. Tech.,  
Professor of Department of ship power stations  
Siberian State University of Water Transport  
33, Shchetinkina str., Novosibirsk 630099, Russian Federation  
e-mail: lebedevbo@list.ru

**Abstract**

Dynamic characteristics of the internal combustion engine in general and its separate elements have significant effect on external and internal indicators of functioning of the power station, especially taking into account dominance of the unsteady modes of behavior. In this regard, development of technologies of determination of parameters of irregularity of rotation in real time during the entire period of operation of the ship power station is necessary.

Theoretical premises and practical results of a method of the analysis of free and forced shifting jerks on the basis of replacement of multimass model of the gross line by discrete are given in work. The expressions describing the nature of change of forced fluctuations taking into account a matrix of the perturbing moments are given. Measurement of amplitudes of fluctuations gives the chance to determine parameters of the transferred torsion torque, to estimate possibility of the resonant phenomena and technical condition of gross lines.

The line of a trend of linear regression of degradation of technical condition of elements of gross lines allowing to define zones of satisfactory and unsatisfactory technical condition of the power station, and practical results of researches of shifting jerks of ship shaft trains with use of the automated computer system is provided. Use of torsigrams with use of the offered method of a research of the unsteady modes of behavior can be used for definition of a torsion torque and power of engines directly in field environment, including, using for processing and the analysis of results of measurements of perspective methods of the wavelet-analysis.

**Keywords:** shifting oscillation, torsion torque, resonance, wavelet analysis

**Введение**

В составе судовых энергетических установок (СЭУ) можно выделить три основные функциональные группы механизмов: двигатель внутреннего сгорания (ДВС), выполняющий функцию многоступенчатого преобразования химической энергии углеводородного топлива в энергию механическую; механизмы передачи преобразованной энергии к исполнительному устройству (редуктор, муфты, валопровод) и потребитель механической энергии (гребной винт).

Характеристики данных групп механизмов влияют на показатели эффективности СЭУ: экономичность, производительность, надежность, экологичность и т.д. Кроме того, в условиях эксплуатации, характеризующихся, как правило, неустановившимися режимами работы судовой движительной установки, происходит еще большее отклонение параметров от заложенных расчетных показателей в худшую сторону. В связи со знакопеременными динамическими

явлениями, возникающими в системе «судовой ДВС – гребной винт», заявленная мощность энергетической установки зачастую полностью не может быть реализована. Динамические характеристики как двигателя в целом, так и его отдельных элементов, оказывают существенное влияние на внешние и внутренние показатели функционирования энергетической установки [1, 2, 3].

В связи с этим, необходимо развитие технологий определения параметров неравномерности вращения в реальном времени в течение всего периода эксплуатации энергетической установки. Такие технологии должны способствовать решению следующих задач: контроль появления чрезмерных нагрузок в критериальных деталях ДВС и элементах валопровода; оценка оптимальности нагружения двигателя и технического состояния вращающихся частей механизмов в эксплуатационных условиях; обеспечение точной обратной связи при управлении движительной установкой; определение величины крутящего

момента на валу; прогнозирование возможного разрушения судовой валовой линии.

**1. Постановка задач исследования**

К прямым методам определения крутящего момента на валах СЭУ следует отнести тензометрирование валопровода и торсиометрирование движительной установки. Прямой метод измерения крутящего момента судовых валовых линий пропульсивных энергетических установок при эксплуатации на неустановившихся режимах работы является более точным, но связан с рядом технических трудностей. В данном исследовании представлен один из возможных путей реализации такой актуальной научно-технической задачи, как разработка метода измерения крутящего момента судового двигателя внутреннего сгорания на основе анализа динамических откликов.

Для динамического анализа СЭУ необходимы конкретные и объективные сведения о технических параметрах всех его элементов, а именно: о моментах инерции, присущим сосредоточенным вращающимся и поступательно движущимся массам кривошипно-шатунного механизма ДВС; о моментах инерции, которыми обладают маховик, реверс-редуктор, промежуточные и гребные валы и гребной винт; а также о передаточных отношениях каждой ступени реверс-редуктора и о конструктивных параметрах промежуточных валов и гребных винтов. Эти данные дают возможность еще на стадии проектирования СЭУ определять вероятные зоны возникновения опасных резонансных явлений во всех возможных в эксплуатации диапазонах скорости и нагрузки судовых ДВС и обеспечивать согласование параметров основных составляющих элементов судовой энергетической установки.

Одним из самых значимых элементов, влияющих на динамические характеристики, в составе пропульсивных энергетических установок является главный двигатель внутреннего сгорания. Динамические показатели судовых ДВС следует рассматривать не только с точки зрения термодинамических и механических процессов, происходящих в двигателе (показатели внутренней динамики), но и со стороны потребителя энергии – гребного винта (внешние динамические характеристики).

При определении величины изменения крутящего момента как функции длины пропульсивной энергетической установки необходимо исследование амплитудных значений  $A_0$  крутящих моментов при изменении координаты  $x$ , измеряемой по длине соответствующего вала или валопровода СЭУ:

$$M(x, t) = A_0(x) \sin \omega t. \quad (1)$$

При анализе свободных и вынужденных крутильных колебаний валовой линии СЭУ целесообразно заменить многомассовую модель валовой линии на дискретную, состоящую из  $n$

масс и  $n-1$  квазиупругих связей. Из условия равенства энергий реальной и дискретной системы определяются соответствующие характеристики элементов расчетной схемы: из равенства потенциальных энергий инерционные, а из равенства кинетических энергий – упругие. Затем определяются передаточные числа каждой массы крутильно-колебательной системы. В случае, если реальная система содержит какую-либо передачу (зубчатую, ременную, цепную и т.д.), за основную следует принимать ту ее часть, которая содержит коленчатый вал ДВС, а оставшиеся после передачи части заменять динамическими эквивалентами.

На стадии замены реальной системы принимается решение о составе дискретной эквивалентной крутильно-колеблющейся системы. Критерий для включения масс в расчетную дискретную систему может быть следующим образом [4, 5, 6, 7]: если размер элемента системы вдоль оси вращения не превышает двух диаметров, то его массу можно считать сосредоточенной в сечении, проходящем через центр тяжести этого элемента.

Обобщенными критериями для включения участка в дискретную систему является следующее определение: если элемент системы имеет протяженность вдоль оси вращения, превышающую его удвоенный диаметр, он разбивается на несколько участков, каждый из которых представляется в виде сосредоточенной массы и двух связанных с ней с обеих сторон податливостей.

Кинетическая энергия системы элементов валовой линии СЭУ определяется в данном случае формулой:

$$T = \frac{1}{2} (J_1 \dot{\varphi}_1^2 + J_2 \dot{\varphi}_2^2 + \dots + J_n \dot{\varphi}_n^2), \quad (2)$$

где  $J$  – моменты инерции элементов валовой линии;  $\varphi$  – углы поворотов элементов валовой линии, отсчитываемые от равновесного недеформированного положения (в равновесном положении эти углы равны нулю).

Потенциальная энергия рассматриваемой валовой линии СЭУ определяется в зависимости от углов поворотов элементов друг относительно друга, а также от величины жесткости на кручение каждого из участков валовой линии  $C$ , по следующей формуле:

$$П = \frac{1}{2} [C_1(\varphi_2 - \varphi_1)^2 + C_2(\varphi_3 - \varphi_2)^2 + \dots + C_{n-1}(\varphi_n - \varphi_{n-1})^2]. \quad (3)$$

Затем определяются величины частот главных крутильных колебаний валовой линии СЭУ и соотношение амплитуд колебаний элементов по длине валовой линии в каждом из главных колебаний. Амплитуды рекомендуется определять относительно массы, соответствующей первому цилиндру двигателя внутреннего сгорания. Для этого в обратную матрицу подставляются последовательно корни характеристического уравнения, а полученный вектор амплитуд относится к амплитуде массы первого цилиндра [4, 5, 6, 7].



Вынужденные колебания валовой линии вызываются действиями переменных, периодически изменяющихся с изменением времени вращающихся моментов, приложенных к мотылевым шейкам судового ДВС. Эти колебания вызывают не только изменение крутящего момента, но и могут быть причиной усталости материала валовой линии, приводящей к поломкам на любом участке валовой линии. В реальных условиях эксплуатации СЭУ вынужденные крутильные колебания валовых линий сопровождаются действием сопротивлений. При достаточном удалении от резонансных частот эти сопротивления оказывают незначительное влияние на амплитуды вынужденных колебаний, а, следовательно, и на изменение крутящего момента, поэтому их влиянием можно пренебречь. В случае же наличия резонансных или околорезонансных колебаний действительные значения амплитуд этих колебаний элементов валовой линии существенно изменяются, и, следовательно, происходит изменение крутящего момента в различных сечениях по длине валовых линий судовой энергетической установки. Таким образом, действительный крутящий момент можно определить лишь с учетом влияния сопротивлений на различных участках.

Прямые методы, позволяющие определять параметры вынужденных колебаний в многомассовых системах любой сложности, основываются на математических методах решения систем линейных алгебраических уравнений, которые определяются на основе уравнений механики Лагранжа-Даламбера. Эти методы предполагают использование непосредственной подстановки параметров, характеризующих возмущающих моменты, в уравнения собственных колебаний. В таких системах дифференциальные уравнения вынужденных колебаний отличаются наличием в правой части возмущающих моментов, приложенных к соответствующим массам, участвующих в передаче крутящего момента. Возмущающие моменты в судовых энергетических установках являются периодическими. Предположим, что эти моменты представлены в виде функции синуса и воздействуют на недиссипативную систему, состоящую из  $(n + 1)$  сосредоточенных в определенных точках масс.

Уравнение вынужденных колебаний для  $k$ -ой гармоники судовой валовой линии в этом случае может выражено формулой:

$$JX + CX = M, \tag{4}$$

где  $M$  – матрица возмущающих моментов.

Данная матрица имеет следующий вид:

$$M = \begin{bmatrix} M_1 \sin(k\omega_{e1}t + \chi_k) \\ M_2 \sin(k\omega_{e2}t + \chi_k) \\ \dots\dots\dots \\ M_{n+1} \sin(k\omega_{en+1}t + \chi_k) \end{bmatrix},$$

где  $k$  – показатель порядка гармонически изменяющегося момента;  $\chi_k$  – значение начальной фазы гармонически изменяющегося момента  $k$ -го порядка;  $\omega_e$  – угловая скорость, зависящая от периода изменения крутящего момента;  $t$  – время отсчета.

Для вынужденных колебаний диссипативных систем по аналогии с выражением (4) справедливым будет следующее уравнение:

$$JX + \Psi X + CX = M, \tag{5}$$

где  $\Psi$  – параметр демпфирования  $j$ -го участка валовой линии.

Диссипативной в данном случае считается такая система, где силы рассеяния энергии, обусловленные внутренним трением в материале, оказывают влияние на собственные частоты колебаний. В таком случае, параметры жесткости  $C$  и рассеянии энергии  $\psi$  на каждом отдельном участке исследуемой диссипативной системы представляют собой связанные параметры. Все действующие в судовых валовых линиях возмущающие моменты, как и любую иную периодическую функцию, удовлетворяющую условиям Дирихле, возможно представить в виде функции от угла поворота коленчатого вала и заменить тригонометрическими рядами посредством разложения в ряды Фурье, представляющие собой сходящиеся бесконечные ряды синусоидальных величин.

Например, гармонические составляющие возмущающих моментов, возникающих от сил давления газов в цилиндре ДВС и вызывающих, в том числе, крутильные колебания, могут быть определены по результатам разложения в ряды Фурье натуральных измерений, позволяющих определить параметры крутящего момента судовой энергетической установки. В качестве таких измерений могут быть использованы цилиндрическая индикаторная диаграмма двигателя внутреннего сгорания и торсиограмма судовой энергетической установки.

Средний крутящий момент на вале двигателя при этом может быть определен в результате динамического расчета двигателя через параметры его геометрии и силовые факторы, действующие в кривошипно-шатунном механизме, по формуле:

$$M_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega_e t) d(\omega_e t). \tag{6}$$

По такому принципу могут быть оценены не только значения крутящих моментов, но и техническое состояние критериальных деталей судовых энергетических машин на основании совместного анализа режимов работы, уровня нагружения и характеристик колебательного

процесса. В качестве параметров контроля работоспособности и состояния пропульсивной установки в данном случае выступают амплитудно-частотные и амплитудно-фазовые характеристики вибрации, непосредственным образом связанные с конструктивными особенностями исследуемого вала и наличием дефектов в материале.

Данный метод анализа может применен к любому из агрегатов судовой энергетической установки и вспомогательных агрегатов судна, к примеру, для анализа колебательных процессов в приводе регулятора частоты вращения. Регулятор частоты вращения по определению является звеном системы, влияющим на параметры неравномерности крутящего момента. На точность процессов регулирования в системах автоматического регулирования оказывают воздействие не только неисправности и инерционные составляющие механизма привода чувствительного элемента регулятора, но также технологические погрешности изготовления, неуравновешенность грузов и демпфирующие элементы, которые должны обеспечивать гашение высокочастотных колебаний, но при этом без искажений передавать колебания низкочастотные.

## 2. Методика проведения исследований

Для практической реализации исследования регрессий критериальных деталей энергетических установок по динамическим характеристикам используется следующий алгоритм [8]:

- изучение конструкторской и эксплуатационной документации;
- определение уровня нагружения при помощи теоретических расчетов и натуральных измерений;
- обнаружение неисправности;
- локализация повреждений;
- оценка технического состояния;
- определение закона и степени развития повреждений;
- прогнозирование остаточного ресурса.

Необходимые сведения, имеющие отношение к валовой линии судовой движительной установки, подлежащей расчету на крутильные колебания, могут быть получены при натуральных исследованиях методом торсиографирования и созданием эскизов, а также путем получения сведений из справочных источников.

Затем на основании анализа колебательных движений исследуемой энергетической установки производится расчет матрицы собственных частот в математической среде MathCAD. Определитель матрицы решается относительно собственных частот колебаний, и вычисляются относительные амплитуды собственных колебаний.

Амплитуды рекомендуется определять относительно массы, соответствующей первому цилиндру двигателя внутреннего сгорания.

Полученные значения измеренных амплитуд колебаний дают возможность определять самые напряженные участки системы, что в итоге позволяет оценить техническое состояние валовых линий судовых энергетических установок.

## 3. Результаты экспериментальных исследований

Для подтверждения представленных теоретических предположений были проведены натурные испытания оценки параметров деградации технического состояния коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания с использованием динамических характеристик СЭУ. Крутильные колебания судовых валопроводов левого и правого борта измерялись при помощи разработанного в Сибирском государственном университете водного транспорта автоматизированного вычислительного комплекса БАГС-4 [9]. Исследованию подвергались валовые линии СЭУ судов типа «РТ-600» проекта 1741А класса «Р», на которых в качестве главных используются дизельные двигатели внутреннего сгорания 6NVD26А-3.

При выявлении тренда, характеризующего деградацию валовых линий судовых энергетических установок и устанавливающего формы зависимости амплитуды колебаний коленчатых валов ДВС от наработки, использовалась методика парного регрессионного анализа. Была взята выборка из генеральной совокупности данных при одинаковых значениях наработки двигателей и произведены вычисления среднеарифметических значений амплитуд крутильных колебаний валовых линий энергетических установок. Это позволяет, в том числе, выявить наиболее опасные при работе СЭУ на неустановившихся режимах (в динамическом отношении) резонансные явления, которые могут возникать в линиях передачи крутящего момента.

Наиболее велика вероятность появления таких резонансных явлений у транспортных машинных агрегатов и установок с ДВС, в которых изменяется не только возмущающее воздействие, но и производится структурное изменение крутильных колебаний. При работе на неустановившихся режимах судовой пропульсивной установки отмечается наличие рассогласования параметров соотношения угловых скоростей и крутящих моментов со стороны гребного винта и, соответственно, рассогласование процессов отбора энергии с последующим выравниванием средних значений угловых скоростей ведущей и ведомой частей системы при переходе к установившемуся режиму работы.

На рис. 1 представлена линия тренда линейной регрессии. Данный график является, по сути, моделью, определяющей среднестатистическую деградацию технического состояния элементов валовых линий энергетических

установок. График имеет две зоны, которые интерпретируются как зона удовлетворительного технического состояния, находящаяся ниже линии тренда, и зона неудовлетворительного технического состояния, которая находится выше линии тренда. Следовательно, накладывая на график параметры амплитуд колебаний и значения наработки двигателей вновь исследуемых валовых линий энергетических установок, мы получаем возможность судить об их техническом состоянии. Необходимо отметить, что графическое представление результатов регрессионного анализа описывает тенденцию ухудшения технического состояния валовых линий, но не выявляет причин его изменения.

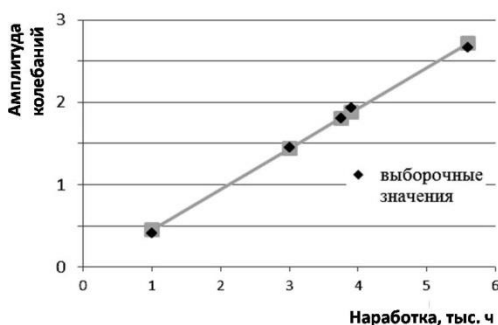


Рис. 1. График зависимости амплитуды колебаний валовых линий энергетических установок от наработки двигателя

Для определения зависимости изменения крутящего момента по длине валовой линии энергетической установки были проведены исследования амплитудных значений колебаний с помощью датчиков модернизированного комплекса БАГС-4. Датчики, определяющие угловые деформации, которые и вызывают колебания крутящего момента в валовой линии машины, устанавливались непосредственно на валу СЭУ. Крепление на валу датчиков, преобразователей и блоков дает возможность сократить длину измерительного тракта от сенсоров, а использование нескольких датчиков по длине валовой линии позволяет более точно и полно определять динамические характеристики машин и напряжения в валах.

Для подтверждения приведенных теоретических предположений было проведено математическое моделирование и определение значений крутящего момента по параметрам крутильных колебаний, развивающихся в элементах движительных установок теплохода «Атаман Ермак» проекта 265.09. Испытания проводились после установки главных двигателей D2876LE407 (6ЧН 12,8/16,6) мощностью 360 кВт при номинальной частоте вращения 1800 об/мин и реверс-редукторных передач HCQ300 с передаточным отношением 2,04:1.

Структурная схема исследуемой движительной установки судна приведена на рис. 2. С

учетом фактических конструктивных решений судна и машинного отделения, доступными для непосредственного исследования оказались следующие элементы – носок коленчатого вала главного двигателя с закрепленным на нем шкивом отбора мощности, вал-проставка и упорный вал валопровода. По расчету крутильных колебаний в исследуемый диапазон частот вращения вошли восемь форм колебаний:

- первая (одноузловая) с частотой 8,5Гц;
- вторая (двухузловая) с частотой 37,9Гц;
- третья (трехузловая) с частотой 62,7 Гц;
- четвертая (четыреузловая) с частотой 111,6 Гц;
- пятая (пятиузловая) с частотой 161,6 Гц;
- шестая (шестиузловая) с частотой 200,1 Гц;
- седьмая (семиузловая) с частотой 230,8 Гц;
- восьмая (восьмиузловая) с частотой 323,9 Гц.

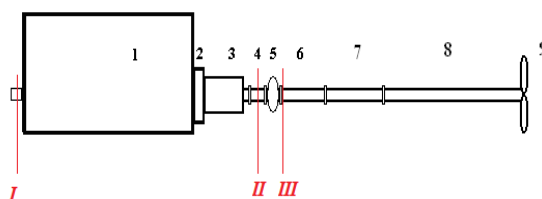


Рис. 2. Структурная схема судовой движительной установки: 1 – двигатель D2876LE407 (6ЧН 12,8/16,6) с демпфером крутильных колебаний; 2 – муфта упругая сегментная; 3 – реверс-редуктор марки HCQ300; 4 – вал-проставка; 5 – шинная муфта валопровода; 6 – упорный вал; 7 – промежуточный вал; 8 – гребной вал; 9 – гребной винт фиксированного шага.

Испытания проводились на реке Иртыш в акватории речного порта г. Омска при различных значениях частоты вращения вала двигателя, находящихся в диапазоне 330...900 об/мин. Продолжительность записи сигналов после непродолжительной работы двигателя при заданном числе оборотов, которое устанавливалось автоматически и синхронно датчиком ТНК-1 либо измерялось посредством тахометра, составляла несколько секунд. Один сигнал записывался у опорного подшипника качения со стороны главного двигателя, а второй сигнал – у гребного вала перед дейдвудным подшипником.

Отличительной особенностью описанного принципа анализа динамических характеристик колебательных систем является возможность использования современных кратномасштабных методов анализа и обработки сигналов на основе вейвлет-преобразований [10, 11]. С помощью данного метода, в частности, было выполнено измерение угловых деформаций, вызванных колебаниями крутящего момента на валовой линии теплохода проекта № 559Б «Капитан Эсаулов». Колебания измерялись в виде сигналов непрерывной функции с заданной частотой дискретизации. Полученный в определенный момент времени сигнал  $A1(t)$  от

первого датчика, закрепленного в определенной точке на валу, в виде динамических характеристик по каждой из осей  $x$ ,  $y$  и  $z$   $A1(t)x$ ,  $A1(t)y$ ,  $A1(t)z$  в функции «время-время» и/или «скорость-время» и/или «ускорение-время», вычитали из соответствующего синхронного по фазе полученного сигнала с динамическими характеристиками от второго датчика, закрепленного в другой определенной точке по длине вала с координатами  $A2(t)x$ ,  $A2(t)y$ ,  $A2(t)z$ .

Результаты исследований позволяют утверждать, что использование вейвлет–анализа позволяет провести достоверную комплексную оценку технического состояния валовых линий. На рис. 2 приведены результаты вычислений показателя Гельдера, являющегося важной характеристикой гладкости функции, определяющей локальную гладкость (локальную нерегулярность) функции в конкретной точке. Измерения выполнялись при различном количестве оборотов вала.

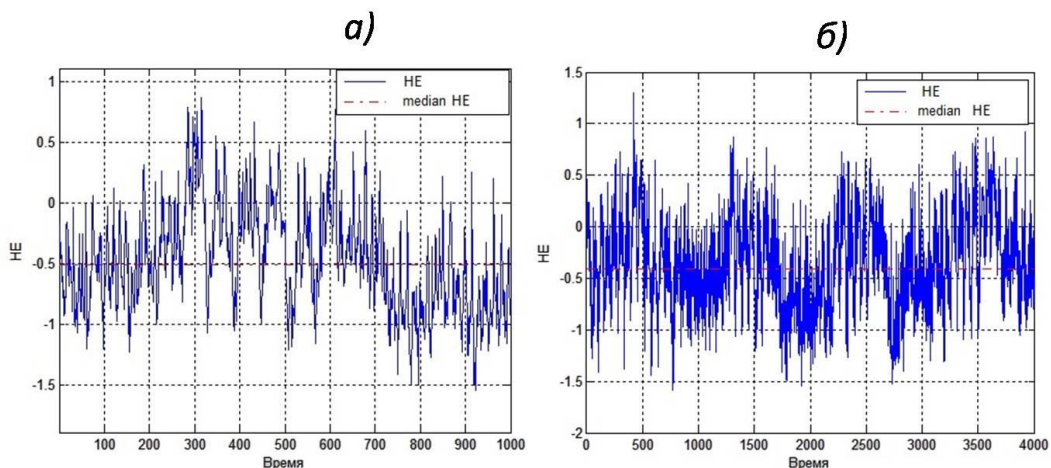


Рис. 2. Вычисленные показатели Гельдера вейвлет–коэффициентов сигнала при частоте вращения вала главного двигателя 900 об/мин: а) за период 1 оборота; б) за период 4 оборота

### Заключение

Отличительным признаком метода определения крутящего момента по динамическим характеристикам от традиционного метода тензометрирования является консервативное значение моментов инерции вращающихся деталей на всех жизненных циклах валовой линии или агрегата – от стадии приработки до списания. Это позволяет использовать метод для определения крутящего момента и мощности капитально отремонтированных двигателей непосредственно в эксплуатационных условиях, в том числе, в корпусе судна и для оценки качества капитального ремонта судовых двигателей в

составе движительных установок с гидродинамически тяжелыми гребными винтами.

Торсионметрирование с использованием предлагаемого метода исследования неустановившихся режимов работы судовых энергетических установок не содержит нежелательных сигналов от прочих нагрузок, характерных для работы движительных установок, и не имеет непрогнозируемых погрешностей, получаемых при монтаже датчиков. Экспериментальные исследования показали, что результаты таких измерений хорошо коррелируются с функцией винтовой характеристики СЭУ. Расхождение измеренных значений мощности во всем диапазоне скоростной характеристики не превышает 4,5 %.

### Литература

1. Глушков С.С., Глушков С.П., Савельев А.В., Ярославцева А.С. Динамические характеристики ДВС / Сибирский научный вестник. – Новосибирск. – 2007. – № X. – С. 164-167.
2. Глушков С.П., Косенко Д.Ю., Кочергин В.И., Красников В.В. Влияние кинетики горения топлива на параметры неравномерности вращения судовых энергетических установок / Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 2(36). – С. 35-41.
3. Кочергин В.И., Алехин А.С. Оценка технического состояния систем автоматического регулирования частоты вращения / Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 1-2. – С. 286-289.
4. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. – М.: Физматлит, 1985. – 474 с.
5. Штельмах С.В., Глушков С.С. Определение гармонических амплитуд возмущающих моментов / Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 2. – С. 180-181.

6. Коврижных, Л. М., Глушков С.С. Расчет амплитуд свободных колебаний дискретных многомассовых систем / Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 2. – С. 162-164.
7. Глушков С.П., Лебедев Б.О. Оценка деградации технического состояния коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания по динамическим характеристикам / Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 2. – С. 191-194.
8. Глушков С.П., Глушков С.С., Лебедев О.Б. Методология исследования регрессий критериальных деталей энергетических установок по динамическим характеристикам / Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. – № 2. – С. 185-187.
9. Глушков С.П., Барановский А.М., Глушков С.С. Автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс для регистрации крутильных колебаний энергетических установок БАГС-4 / Сибирский научный вестник. – 2006. – № 9. – С. 109-112.
10. Глушков С. П., Глушков С.С., Сигимов В.И. Вейвлет-функции Морлета в исследовании переменных составляющих крутящего момента двигателей внутреннего сгорания / Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 2. – С. 45-51.
11. Глушков С.П., Жидких В.О. Выбор вейвлет-образующей функции для анализа динамических характеристик сигнала двигателя внутреннего сгорания / Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 1. – С. 51-56.

#### References

1. Glushkov S.S., Glushkov S.P., Savel'ev A.V., Iaroslavtseva A.S. Dinamicheskie kharakteristiki DVS [Dynamic characteristics of internal combustion engines]. Sibirskii nauchnyi vestnik, 2007, No X, pp. 164-167.
2. Glushkov S.P., Kosenko D.Iu., Kochergin V.I., Krasnikov V.V. Vliianie kinetiki goreniia topliva na parametry neravnomernosti vrashcheniia sudovykh energeticheskikh ustanovok [Influence of kinetics of burning of fuel on parameters of irregularity of rotation of ship power stations]. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 2017, No 2(36), pp. 35-41.
3. Kochergin V.I., Alekhin A.S. Otsenka tekhnicheskogo sostoiianiia sistem avtomaticheskogo regulirovaniia chastoty vrashcheniia [Assessment of technical condition of systems of automatic regulation of rotating speed]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka, 2014, No 1-2, pp. 286-289.
4. Timoshenko S.P., Iang D.Kh., Uiver U. Kolebaniia v inzhenernom dele [Fluctuations in engineering]. – Moscow, Fizmatlit, 1985, 474 p.
5. Shtel'makh S.V., Glushkov S.S. Opredelenie garmonicheskikh amplitud vozmushchaiushchikh momentov [Determination of harmonious amplitudes of the perturbing moments]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka, 2008, No 2, pp. 180-181.
6. Kovrizhnykh, L. M., Glushkov S.S. Raschet amplitud svobodnykh kolebaniy diskretnykh mnogomassovykh sistem [Calculation of amplitudes of free fluctuations of discrete multimass systems]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka, 2008, No 2, pp.162-164.
7. Glushkov S.P., Lebedev B.O. Otsenka degradatsii tekhnicheskogo sostoiianiia kolenchatykh valov dvigatelei vnutrennego sgoraniia po dinamicheskim kharakteristikam [Assessment of degradation of technical condition of crankshafts of internal combustion engines on dynamic characteristics]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka, 2013, No 2, pp.191-194.
8. Glushkov S.P., Glushkov S.S., Lebedev O.B. Metodologiya issledovaniia regressii kriterial'nykh detalei energeticheskikh ustanovok po dinamicheskim kharakteristikam [Methodology of a research of regressions of criteria parts of power stations on dynamic characteristics]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka, 2012, No 2, pp.185-187.
9. Glushkov S.P., Baranovskii A.M., Glushkov S.S. Avtomatizirovannyi izmeritel'no-vychislitel'nyi kompleks dlia registratsii krutil'nykh kolebaniy energeticheskikh ustanovok BAGS-4 [The automated measuring computer system for registration of shifting jerks of energy units BAGS-4]. Sibirskii nauchnyi vestnik, 20067, No 9X, pp. 109-112.
10. Glushkov S. P., Glushkov S.S., Sigimov V.I. Veivlet-funktsii Morleta v issledovanii peremennykh sostavliaiushchikh krutiashchego momenta dvigatelei vnutrennego sgoraniia [Wavelet functions the Morlet in a research of variable components of a torsion torque of internal combustion engines]. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia, 2016, No 2, pp. 45-51.
11. Glushkov S.P., Zhidkikh V.O. Vybor veivlet-obrazuiushchei funktsii dlia analiza dinamicheskikh kharakteristik signala dvigatelya vnutrennego sgoraniia [The choice of the forming wavelet function for the analysis of dynamic characteristics of a signal of the internal combustion engine]. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia, 2017, No 1, pp. 51-56.

УДК 621.31

## ТОКОВАЯ РАЗГРУЗКА СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОДВОДНЫЙ АППАРАТ

**Владимир Александрович Герасимов**

кандидат технических наук, заведующий лабораторией Энергетики подводных робототехнических комплексов  
Институт проблем морских технологий  
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5А  
e-mail: [fobos\\_v@mail.ru](mailto:fobos_v@mail.ru)

**Антон Владимирович Комлев**

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры Судовой энергетики и автоматике  
Дальневосточный федеральный университет  
690091, Владивосток, ул. Суханова, 8  
e-mail: [kom86@bk.ru](mailto:kom86@bk.ru)

**Михаил Владимирович Красковский**

аспирант кафедры Судовой энергетики и автоматике  
Дальневосточный федеральный университет  
690091, Владивосток, ул. Суханова, 8  
e-mail: [mikhail51289@yandex.ru](mailto:mikhail51289@yandex.ru)

**Алексей Юрьевич Филоженко**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории Энергетики подводных  
робототехнических комплексов  
Институт проблем морских технологий  
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5А  
e-mail: [filozhenko\\_a@mail.ru](mailto:filozhenko_a@mail.ru)

### Аннотация

Определена структура системы бесконтактной передачи электроэнергии на борту автономного необитаемого подводного аппарата для осуществления зарядки его аккумуляторных батарей при подводном базировании. Поставлена задача повышения эффективности системы бесконтактной передачи электроэнергии путём токовой разгрузки силовых транзисторов автономного инвертора за счёт компенсации индуктивной составляющей его выходного тока. Рассмотрены известные технические решения и обосновано применение для решения поставленной задачи последовательной резонансной цепи из индуктивности и конденсатора, включаемых параллельно первичной обмотке трансформатора. Выполнено математическое моделирование системы с подключённой резонансной цепью и определены рекомендации по выбору параметров режима работы, приводящие к решению поставленной задачи. Анализ диаграмм сигналов, полученных при математическом моделировании, позволил сформулировать требования, обеспечивающие «мягкое переключение» как при включении, так и при выключении силовых ключей автономного инвертора. Найденные решения позволили минимизировать потери мощности в инверторе, уменьшить нагрев его элементов и повысить надёжность и эффективность работы, сводящуюся к осуществлению зарядки аккумуляторных батарей аппарата за требуемый интервал времени. Показано, что использование резонанса на вторичной стороне трансформатора позволяет деформировать внешнюю характеристику системы в желаемом направлении, что позволяет повысить уровень передаваемой на выход электрической мощности при сохранении минимальных потерь в инверторе. Приведённые теоретические выводы хорошо подтверждаются натурным экспериментом.

**Ключевые слова:** автономный необитаемый подводный аппарат, бесконтактная передача электроэнергии, автономный инвертор напряжения, «мягкая коммутация», последовательная резонансная цепь, параллельный резонанс.

## THE CURRENT UNLOADING OF THE CONTACTLESS POWER TRANSMISSION SYSTEM TO THE UNDEWATER VEHICLE

**Vladimir A. Gerasimov**

Candidate of Technical Science, Head of Laboratory Underwater Robotic Systems Energy  
Institute of Marine Technology Problems  
5A, Sukhanova str., Vladivostok 690091  
e-mail: [fobos\\_v@mail.ru](mailto:fobos_v@mail.ru)

**Anton V. Komlev**

Candidate of Technical Science, Senior Lecturer of Marine Energy and Automation Department  
Far Eastern Federal University



8, Sukhanova str., Vladivostok 690091

e-mail: [kom86@bk.ru](mailto:kom86@bk.ru)

**Mikhail V. Kraskovskiy**

Postgraduate of Marine Energy and Automation Department

Far Eastern Federal University

8, Sukhanova str., Vladivostok 690091

e-mail: [mikhail51289@yandex.ru](mailto:mikhail51289@yandex.ru)

**Aleksey Yu. Filozhenko**

Candidate of Technical Science, Senior Researcher of Laboratory Underwater Robotic Systems Energy

Institute of Marine Technology Problems

5A, Sukhanova str., Vladivostok 690091

e-mail: [filozhenko\\_a@mail.ru](mailto:filozhenko_a@mail.ru)

### Abstract

The structure are determined the contactless power transmission system on board the autonomous unmanned underwater vehicle for charging its batteries at underwater basing. The task of increasing the effectiveness of the contactless power transmission system by current discharge transistors autonomous inverter due to the compensation of inductive component of its output current. The known technical solutions are considered and substantiated application to the task serial resonance circuit of the inductor and a capacitor connected in parallel of the primary winding of the transformer. Mathematical modeling of systems with connected resonant circuit is done and identified recommendations on the choice of parameters and operating modes, resulting in a solution of the task. Analysis of signal diagrams obtained by mathematical modeling, allowed to formulating requirements to ensure a "soft switch" as when turned on, and when you turn off the power of autonomous inverter keys. These solutions allow to minimize the power loss in inverter, reduce the heat of its elements and to improve the reliability and efficiency, which reduces the implementation of the battery charging apparatus for the desired time interval. It is shown that the use of resonance on the secondary side of the transformer allows you to distort the external characteristic of system in the desired direction, which can increase the level of electric power transmitted to the output while maintaining a minimal loss in the inverter. These theoretical conclusions are well supported by experiment.

**Keywords:** autonomous unmanned underwater vehicle, contactless power transmission, autonomous voltage inverter, «soft-switching», series resonant circuit, parallel resonance.

### Введение

Повышение оперативности процесса зарядки аккумуляторных батарей автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) со значительным расширением его функциональных возможностей осуществляется при использовании бесконтактного способа передачи электроэнергии [1, 2]. В таком процессе участвует специальный трансформатор с разделяющимися первичной и вторичной частями, которые представляют собой прочные герметичные оболочки с размещенными внутри электрическими обмотками. Первичная часть такого трансформатора помещается на базе, а вторичная – устанавливается на АНПА. При причаливании аппарата к базе и совмещении контактных поверхностей первичной и вторичной частей трансформатора осуществляется передача электроэнергии на борт подводного аппарата за счет возникающей индукционной связи между его обмотками. Для питания первичной обмотки трансформатора применяется автономный инвертор напряжения (АИН), размещаемый на базе в прочном контейнере с возможностью погружения под воду на глубину нахождения АНПА. Инвертор выполняет преобразование электроэнергии базового источника в напряжение высокой частоты, способствующее снижению массы и габаритов трансформатора, а также

обеспечивающий необходимое регулирование передаваемой электроэнергии [3].

### 1. Повышение коэффициента мощности нагрузки инвертора

Первичная и вторичная части трансформатора представляют собой отдельные герметичные оболочки, в которые помещены его первичная и вторичная обмотки. Каждая из оболочек имеет выполненную из изоляционного материала контактную стенку, толщина которой достигает нескольких миллиметров. В режиме передачи энергии оси обмоток должны совпадать, а их торцы находиться на минимальном расстоянии друг относительно друга. Тем самым эти обмотки образуют трансформатор, который, в связи с наличием указанного немагнитного конструктивного зазора между торцами обмоток, имеет пониженное значение коэффициента  $k$  магнитной связи. Этот коэффициент  $k = M / \sqrt{L_1 L_2}$  определяется взаимной индуктивностью  $M$  между обмотками трансформатора, а также собственными индуктивностями  $L_1$  и  $L_2$  его первичной и вторичной обмоток [4].

Низкое значение коэффициента  $k$  магнитной связи между обмотками трансформатора приводит к повышенному току намагничивания последнего и, как следствие, увеличенным потерям мощности на транзисторных ключах автономного инвертора, выход которого

подключен к первичной обмотке трансформатора. Это требует применения дополнительных мер по отводу тепла от транзисторов, что усложняется требованием выполнения плотной компоновки инвертора в ограниченных размерах прочного контейнера. По этой причине определение решений, позволяющих уменьшить ток ключей инвертора при сохранении значения передаваемой мощности, представляется актуальным, т.к. уменьшение тепловых нагрузок на электронные элементы приводит к повышению надежности устройства и увеличению эффективности процесса бесконтактного заряда аккумуляторных батарей подводного аппарата в целом.

В общем случае суммарные потери мощности на ключах инвертора складываются из динамических потерь переключения и статических потерь в открытом состоянии ключа, потери от токов утечки в закрытом состоянии можно не учитывать как малые. В [5] уделяется основное внимание минимизации динамических потерь при включении, что достигается созданием условий включения при нулевом напряжении на ключе – режимом ZVS (zero voltage switching). Такой режим носит название «мягкой коммутации» при включении. Вместе с тем расчеты и эксперименты показывают, что динамические потери, как при выключении, так и потери мощности на ключах в открытом состоянии вносят значительный вклад в общую сумму потерь. Таким образом, дополнительное обеспечение условий «мягкой коммутации» при выключении, что достигается, очевидно, выключением при нулевом токе – режимом ZCS (zero current switching) [6-8], является задачей актуальной. Кроме этого, актуальной является также задача поиска решений снижения потерь проводимости в интервале открытого состояния ключей, при этом должно сохраняться значение передаваемой мощности.

Задачу токовой разгрузки ключей в режиме проводимости можно решить за счет применения резонансной цепи из последовательно соединенных индуктивности и емкости, подключаемой на выходе инвертора параллельно первичной обмотке трансформатора [9]. Эта цепь компенсирует индуктивную составляющую выходного тока инвертора, но практически не влияет на форму и значения токов обмоток трансформатора, т.е. обеспечивает снижение действующего значения выходного тока инвертора при сохранении уровня передаваемой мощности. Применяемая

резонансная цепь имеет собственную резонансную частоту  $f_U$ , соответствующую резонансу напряжений.

$$f_U = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}, \quad (1)$$

где  $L$  и  $C$  – соответственно индуктивность и ёмкость резонансной цепи.

Вместе с тем, рабочая частота  $f$  коммутации АИН должна соответствовать частоте  $f_i$  резонанса токов в его нагрузке, состоящей из параллельно включенных указанной резонансной LC-цепи и первичной обмотки трансформатора, так как при этом условии обеспечивается минимальная токовая нагрузка на транзисторные ключи АИН.

Для первой гармоники переменного напряжения на выходе АИН справедливо соотношение

$$f = f_i = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L + L_1) C}}. \quad (2)$$

При этом же условии индуктивность  $L$  реактора и ёмкость  $C$  конденсатора резонансной цепи можно определить по формулам [10,11]:

$$L = \frac{L_1}{m^2 - 1}, \quad (3)$$

$$C = \frac{m^2 - 1}{(2\pi \cdot m \cdot f)^2 L_1}, \quad (4)$$

где параметр  $m = f_U / f_i$  – это отношение собственной частоты резонансной LC-цепи (частоты резонанса напряжений) к рабочей частоте коммутации АИН (частоте резонанса токов цепи нагрузки АИН). Выбор численного значения параметра  $m$  определяется на основе компромисса между желаемым снижением тока ключей АИН и приемлемыми значениями реактивных мощностей ёмкости и индуктивности резонансной цепи.

Для выходного напряжения в виде меандра частота  $f$  коммутации АИН (2) должна отличаться от резонансной частоты  $f_i$  и это отличие можно определить относительной частотой  $n_i = f / f_i$ . Значение  $n_i$ , соответствующее резонансу токов в нагрузке АИН при прямоугольной форме напряжения на его выходе, должно быть несколько больше единицы.

Схема силовой части АИН, положенная в основу математической модели, показана на рисунке 1.

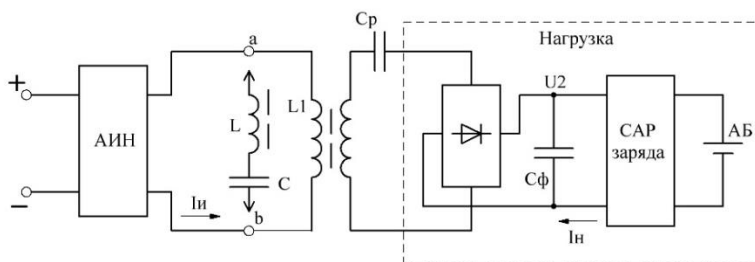


Рис. 1. Функциональная схема системы бесконтактной передачи электроэнергии

Результаты моделирования для режима холостого хода трансформатора, иллюстрирующие эффект от введения резонансной LC-цепи, приведены на рисунке 2.

При подключении параллельно первичной обмотке трансформатора резонансной LC-цепи, показанной на рисунке 1, форма выходного тока инвертора и интервалы проводимости ключей и диодов изменяются по отношению к исходному состоянию (рисунок 2, а) без резонансной цепи и принимает вид, показанный на рисунке 2, б. В этом случае для первой гармоники выходного напряжения АИН резонанс токов в его нагрузке соответствует значению относительной частоты  $n_f = 1$ .

## 2. Математическое моделирование

Результаты моделирования показывают, что таким образом можно уменьшить действующее значение тока инвертора примерно в 2,5 раза [10,11]. Однако соответствующего уменьшения потерь мощности здесь не происходит. Причиной такого результата является форма тока инвертора, при которой, так же как и исходном варианте, в моменты времени  $t_2$  и  $t_4$  выключения ключей ток имеет максимальное значение. Это значение меньше, чем амплитуда пилообразной формы тока на рисунке 2, а, и равно примерно 0,6, но этого оказывается достаточно, чтобы суммарные потери в инверторе остались на высоком уровне.

Существенное снижение мощности потерь в инверторе можно получить при переходе к «мягкой коммутации», что будет выполняться при определенном значении относительной частоты  $n_f > 1$ . В этом режиме выключение транзисторов инвертора происходит при нулевом токе и сопровождается минимальными динамическими потерями (рисунок 2, в). Вместе с тем, чрезмерное повышение значения  $n_f$  даже при сохранении режима «мягкой коммутации» приведет к возрастанию потерь проводимости в открытом состоянии от увеличенной емкостной составляющей тока нагрузки инвертора.

Конкретный диапазон значений относительной частоты  $n_f$ , был установлен путем математического моделирования в программе MATLAB с использованием моделей АИН,

приведенных в [10-12]. Этот диапазон должен удовлетворять условиям минимальных потерь в ключах инвертора как в режиме холостого хода трансформатора, так и в полном диапазоне его нагрузок, включая последствия от неточной стыковки первичной и вторичной частей трансформатора.

Полученные результаты приведены на рисунке 3, где переменные показаны в относительных единицах, при этом за базу приняты значения этих переменных при отсутствии резонансной цепи. На рисунке 3 показаны зависимости тока  $I_{OFF}^*$  через транзисторы инвертора в момент подачи управляющего сигнала на отключение, а также действующее значения тока  $I_{и}^*$  инвертора и мощность  $P_{и}^*$  потерь в инверторе в функции относительной частоты  $n_f = f / f_1$ .

Из этих графиков следует, что значение тока  $I_{OFF}^*$  и, соответственно, потери при выключении достигают нуля при относительной частоте  $n_{f1} = 1,09$ . Область на плоскости графиков, расположенная справа от частоты  $n_{f1}$ , соответствует области ZCS (переключение при нулевом токе) и здесь нулевые потери на выключение сохраняются. Слева от частоты  $n_{f2} = 1,19$  расположена область ZVS (переключение при нулевом напряжении), которая соответствует индуктивному режиму нагрузки инвертора и характеризуется нулевыми потерями на включение. Диапазон значений относительной частоты от  $n_{f1} = 1,09$  до  $n_{f2} = 1,19$ , обеспечивающий минимальные потери, как на включение, так и на отключение транзисторов инвертора, установлен по результатам моделирования. Как компромиссное решение целесообразно принять значение относительной частоты из этого диапазона ближе к левой его границе, например,  $n_f = n_{f1} = 1,1$ , обеспечивающее минимальные суммарные потери на транзисторах. Компромисс заключается в том, что при выборе значения относительной частоты  $n_{f1} > 1,09$  или  $n_{f2} < 1,19$  потери переключения остаются нулевыми, а несколько увеличиваются потери проводимости за счет увеличения выходного тока инвертора.

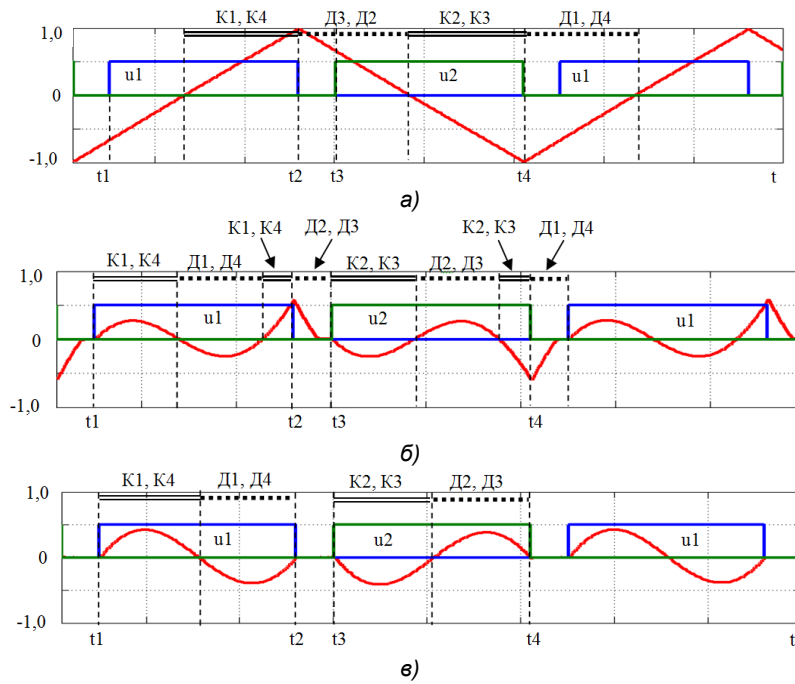


Рис. 2. Диаграммы выходного тока АИН при изменении параметров резонансной цепи:

- а – резонансная цепь отсутствует;
- б – параметры резонансной цепи соответствуют относительной частоте  $n_l = 1$ ;
- в – параметры резонансной цепи соответствуют нулевым потерям переключения при  $n_l > 1$

Графики на рисунке 3 определены для некоторого  $m = f_U / f_I = const$  и соответствуют определенным значениям индуктивности реактора  $L$  и емкости  $C$  резонансной цепи. Вместе с тем, существует такое значение параметра  $m = m^*$ , при котором мощности этих элементов будут минимальны при сохранении минимальных потерь в инверторе. Для определения этого значения  $m^*$  можно использовать зависимости относительных

мощностей реактора  $S_L^*$  и конденсатора  $S_C^*$  резонансной цепи в функции параметра  $m$ , которые определяются путем математического моделирования инвертора при условии обеспечения в нем минимальных потерь. Исследования показали, что габариты этих элементов достигают минимальных значений при  $1,5 < m < 2,2$ . Принимая значение  $m^* = 2$ , можно определить требуемые значения  $L$  и  $C$  резонансной цепи.

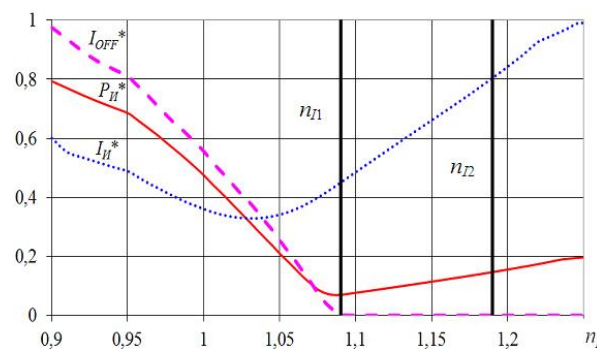


Рис. 3. Частотные характеристики АИН в режиме холостого хода:

$I_{OFF}^*$  – ток через ключи к моменту выключения;  $P_n^*$  – мощность потерь в АИН;  $I_n^*$  – действующее значение выходного тока АИН

**Заключение**

Применение выбранного технического решения с использованием последовательной резонансной цепи на первичной стороне трансформатора позволило снизить ток силовых ключей инвертора не менее чем в 2,5 раза, при этом мощность, передаваемая на подводный

аппарат, осталась неизменна. Полученный результат существенно поднимает качественные показатели системы и позволяет заключить, что поставленная задача токовой разгрузки системы бесконтактной передачи электроэнергии для заряда аккумуляторных батарей подводного аппарата успешно решена.

## Литература

1. Stanimir S. Valtchev, Elena N. Baikova, Luis R. Jorge Electromagnetic Field as the Wireless Transporter of Energy. *Facta Universitatis, Ser: Elec. Energ.* Vol. 25, № 3, December 2012, pp. 171 – 181.
2. S.K. Singh, T.S. Hasarmani, R.M. Holmukhe. Wireless Transmission of Electrical Power Overview of Recent Research and Development. *International Journal of Computer and Electrical Engineering.* – 2012. – P. 207-211.
3. Патент 2502170, Российская федерация. Устройство для бесконтактной передачи электроэнергии на подводный объект (варианты) Герасимов В.А., Копылов В.В, Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И. Оpubл. 2013, Бюл. №35.
4. Герасимова Г.Н., Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Усольцев В.К. Топологические методы анализа в электротехнике и автоматике: учеб. пособие для вузов. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 232 С.
5. В.И. Мелешин. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
6. Ching-Ming Lai, Ming-Ji Yang, Shih-Kun Liang. A Zero Input Current Ripple ZVS/ZCS Boost Converter with Boundary-Mode Control. *Energies.* – 2014. – P. 6765-6782.
7. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P. *Power electronics. –Converters, Applications, and Design.* USA, Hoboken: John Willey & Sons Ltd, 2003. – 802 p.
8. Won-suk Choi, Sungmo Young. Analysis of MOSFET Failure Modes in LLC Resonant Converter // Сайт компании Fairchild. – 2009. – 12 С. [Электронный ресурс]. URL: <http://fairchildsemi.com>
9. Патент 2558681, Российская федерация. Автономный инвертор напряжения для питания нагрузки через трансформатор с низким коэффициентом связи между его обмотками / Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Себто Ю.Г., Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И., Красковский М.В. Оpubл. 2015, бюл. № 22.
10. Герасимов В.А., Красковский М.В, Кувшинов Г.Е., Филоженко А.Ю. Использование резонанса для токовой разгрузки транзисторных ключей инвертора. Двойные технологии. 2016 г. №4 (77). С. 55 – 60.
11. Kraskovskiy M.V., Gerasimov V.A., Kuvshinov G.E., Filozhenko A.Yu. The Use of Resonance for Current Downloading of the Transistor Keys of the Inverter // *International Journal of Control Theory and Applications.* – 2016. Vol. 9, Is. 13.– P. 305-311.
12. Герасимов В.А., Красковский М.В., Кувшинов Г.Е., Филоженко А.Ю. Повышение эффективности бесконтактной передачи электроэнергии на автономный подводный аппарат. Подводные исследования и робототехника. 2016 г № 1. С. 24 – 30.

## References

1. Stanimir S. Valtchev, Elena N. Baikova, Luis R. Jorge Electromagnetic Field as the Wireless Transporter of Energy. *Facta Universitatis, Ser: Elec. Energ.* Vol. 25, № 3, December 2012, pp. 171 – 181.
2. S.K. Singh, T.S. Hasarmani, R.M. Holmukhe. Wireless Transmission of Electrical Power Overview of Recent Research and Development. *International Journal of Computer and Electrical Engineering.* – 2012. – P. 207-211.
3. Gerasimov V.A., Kopylov V.V., Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I. *Ustroystvo dlya beskontaktnoy peredachi elektroenergii na podvodnyy ob'ekt (varianty) [Device for contactless power transmission for underwater object].* Patent RF, no. 2502170. 2013.
4. Gerasimova G.N., Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Usol'tsev V.K. *Topologicheskie metody analiza v elektrotekhnike i avtomatike: ucheb. posobie dlya vuzov [Topological methods of analysis in electrical engineering and automation: educational manual for high schools].* – Vladivostok: Dal'nauka, 2001. – 232 p.
5. V.I. Meleshin. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika [Transistor Conversion Technology]* M.: Tekhnosfera, 2006. – 632 p.
6. Ching-Ming Lai, Ming-Ji Yang, Shih-Kun Liang. A Zero Input Current Ripple ZVS/ZCS Boost Converter with Boundary-Mode Control. *Energies.* – 2014. – P. 6765-6782.
7. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P. *Power electronics. –Converters, Applications, and Design.* USA, Hoboken: John Willey & Sons Ltd, 2003. – 802 p.
8. Won-suk Choi, Sungmo Young. Analysis of MOSFET Failure Modes in LLC Resonant Converter // *Web-site of company Fairchild.* – 2009. – 12 С. URL: <http://fairchildsemi.com>.
9. Kuvshinov G.E., Naumov L.A., Sebto Yu.G., Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I., Kraskovskiy M.V. *Avtonomnyy invertor napryazheniya dlya pitaniya nagruzki cherez transformator s nizkim koeffitsientom svyazi mezhdu ego obmotkami [An autonomous voltage inverter for supplying a load through a transformer with a low coupling coefficient between its windings].* Patent RF, no. 2558681. 2015.
10. Gerasimov V.A., Kraskovskiy M.V, Kuvshinov G.E., Filozhenko A.Yu. *Ispol'zovanie rezonansa dlya tokovoy razgruzki tranzistornykh klyuchey invertora [Using a resonance for current discharging of transistors switch in the inverter].* *Dvoynye tekhnologii.* No. 4 (77). P. 55-60.
11. Kraskovskiy M.V., Gerasimov V.A., Kuvshinov G.E., Filozhenko A.Yu. The Use of Resonance for Current Downloading of the Transistor Keys of the Inverter. *International Journal of Control Theory and Applications.* – 2016. Vol. 9, Is. 13.– P. 305-311.
12. Gerasimov V.A., Kraskovskiy M.V., Kuvshinov G.E., Filozhenko A.Yu. *Povyshenie effektivnosti beskontaktnoy peredachi elektroenergii na avtonomnyy podvodnyy apparat [Improving the efficiency of contactless power transmission for Autonomous underwater vehicle].* *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika.* No. 1. P. 24-30.

УДК 614.842/847: 614.842/844: 614.842/894

## ИННОВАЦИИ В ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ПОМЕЩЕНИЙ СУДОВ (КОРАБЛЕЙ)

**Андрей Дмитриевич Ищенко**

кандидат технических наук,  
профессор кафедры пожарной тактики и службы  
Академии Государственной противопожарной службы МЧС России  
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4  
e-mail: [adinko@mail.ru](mailto:adinko@mail.ru)

**Владимир Васильевич Роевко**

кандидат технических наук, профессор  
профессор кафедры пожарной и аварийно-спасательной техники  
Академии Государственной противопожарной службы МЧС России  
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4  
e-mail: [piroemail@bk.ru](mailto:piroemail@bk.ru)

**Игорь Геннадьевич Малыгин**

доктор технических наук, профессор  
директор ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН  
199178, Санкт-Петербург, В.О., 12 линия, д. 13  
e-mail: [malygin\\_com@mail.ru](mailto:malygin_com@mail.ru)

**Владимир Ильич Комашинский**

доктор технических наук, доцент  
заместитель директора по научной работе ФГБУН Институт проблем транспорта  
им. Н.С. Соломенко Российской академии наук  
199178, Санкт-Петербург, В.О., 12 линия, д. 13  
e-mail: [kama54@rambler.ru](mailto:kama54@rambler.ru)

### Аннотация

В работе приведена проблематика тушения пожаров энергетических установок и помещений судов (кораблей) в разрезе применения для тушения пожаров стационарных установок пожаротушения, которые в качестве огнетушащего вещества используют различные огнетушащие вещества. Проанализированы способы тушения пожаров энергетических установок и помещений судов (кораблей) с точки зрения опасности для команды и участников тушения пожара, создания необходимого запаса огнетушащих веществ, а также совокупности факторов, осложняющих прекращение горения. Рассмотрены возможности и перспективы применения в качестве огнетушащего вещества водной среды в метастабильном фазовом состоянии. Уделено внимание физическим и техническим аспектам получения водной среды в метастабильном фазовом состоянии, влиянию среды на процесс пламенного горения и безопасность для человека. Представлены возможности и характер использования технологии получения водной среды в метастабильном фазовом состоянии для тушения пожаров и показаны перспективы использования технологии для обеспечения других судовых (корабельных) нужд. Отмечено, что технология основана на управляемом изменении свойств воды при различных фазовых и метастабильных состояниях, преимущества технологии получения водной среды в метастабильном фазовом состоянии для тушения пожаров по сравнению с традиционными способами и технологиями получения огнетушащих веществ, в том числе электробезопасность при тушении пожара по сравнению с традиционными способами подачи воды и водных растворов. Рассмотрен характер воздействия водной среды в метастабильном фазовом состоянии на горение в помещении с энергетической установкой судна и механизм его подавления. Определены перспективы приспособления технологии получения водной среды в метастабильном фазовом состоянии для тушения пожаров объемным способом на судах (кораблях).

**Ключевые слова:** пожар, объемное тушение, судовая (корабельная) энергетическая установка, водная среда, взрывное вскипание, метастабильное фазовое состояние, активация, коагуляция, пар, конденсация

## INNOVATIONS IN FIRE EXTINGUISHING OF ENERGY INSTALLATIONS AND VESSELS (SHIPS)

**Andrey D. Ishchenko**

cand.tech.sci., the professor of department of fire fighting management and service  
Academy of the state fire service of emergcom of russia  
Borisa Galushkina, 4, Moscow, 129366  
e-mail: [adinko@mail.ru](mailto:adinko@mail.ru)



**Vladimir V. Roenko**

the professor, Cand.Tech.Sci., the professor of department of fire and rescue technology  
Academy of the state fire service of emercom of russia  
Borisa Galushkina, 4, Moscow, 129366  
e-mail: [piroemail@bk.ru](mailto:piroemail@bk.ru)

**Igor G. Malygin**

the professor, Dr.Sci.Tech.,director  
Institute of transport problems n.s.solomenko of the russian academy of sciences  
12-ya liniya VO, 13(4th floor), Saint-Petersburg, 199178  
e-mail: [malygin\\_com@mail.ru](mailto:malygin_com@mail.ru)

**Vladimir I. Komashinskiy**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Science  
Solomenko institute of transport problems of the russian academy of sciences.  
12-ya liniya VO, 13(4th floor), Saint-Petersburg, 199178  
e-mail: [kama54@rambler.ru](mailto:kama54@rambler.ru)

**Abstract**

The problems of extinguishing fires of power plants and spaces of ships (ships) in the context of using for extinguishing fires of stationary extinguishing installations are given, which use various extinguishing agents as a fire extinguishing agent. The methods of extinguishing fires of power plants and spaces of ships (ships) from the point of view of danger for the team and participants in fire extinguishing, creating the necessary stock of fire extinguishing substances, as well as a set of factors complicating the cease-fire are analyzed. The possibilities and prospects of using the aqueous medium in the metastable phase state as a fire-extinguishing agent are considered. Attention is paid to the physical and technical aspects of obtaining an aqueous medium in the metastable phase state, the effect of the medium on the combustion process and safety for humans. The possibilities and character of using the technology of obtaining an aqueous medium in the metastable phase state for extinguishing fires are presented and the prospects of using the technology for providing other ship (ship) needs are shown. It is noted that the technology is based on controlled changes in water properties under various phase and metastable states, the advantages of technology for obtaining an aqueous medium in the metastable phase state for extinguishing fires in comparison with traditional methods and technologies for obtaining fire extinguishing substances, including electrical safety in extinguishing a fire in comparison with traditional methods of water supply and water solutions. The nature of the effect of the aqueous medium in the metastable phase state on combustion in a room with an energy installation of the ship and the mechanism for its suppression are considered. The prospects of adapting the technology of obtaining an aqueous medium in a metastable phase state for extinguishing fires by volumetric method on ships (ships) are determined.

**Keywords:** fire, volumetric method of fire fighting, ship power plant, aqueous medium, boil-off, metastable phase state, activation, coagulation, steam, condensation.

**Введение**

Для тушения пожаров предусматриваются стационарные судовые (корабельные) автоматические установки пожаротушения (АУПТ), которые применяют различные огнетушащие вещества (ОТВ).

Возможным методом прекращения открытого горения с наличием опасных для жизни и здоровья человека факторов является тушение объемным способом, то есть заполнением объема (или части объема) горящего помещения (отсека) судна (корабля) огнетушащим составом.

При объемном способе пожаротушения прекращение открытого горения осуществляется без входа человека в помещение (отсек) пожара, поэтому риск воздействия на человека опасных факторов пожара существенно уменьшается. Важно также использовать такую технологию объемного пожаротушения, при которой помимо прекращения открытого горения осуществляется также уменьшение температуры внутри судовых помещений, а также осаждение дыма.

Для достижения стабильного эффекта тушения установка объемного пожаротушения

должна иметь производительность, позволяющую компенсировать утечку ОТВ из горящего помещения (отсека), и запас ОТВ, превышающий расчетное время тушения пожара.

Наиболее распространенными средствами объемного тушения являются газы и сложные химические составы, которые опасны для людей. Поэтому перспективным направлением совершенствования способов тушения пожаров на судах (кораблях) является объемное тушение веществом, запас которого может быть создан на судне в избытке и безопасного для людей.

**1. Возможности тушения пожаров энергетических установок и помещений судов водной средой**

Вода является наиболее эффективным и распространенным средством тушения пожаров. При этом вода, как огнетушащее вещество, применяется чаще всего в качестве средства поверхностного тушения. Известным способом объемного тушения пожаров водой является паротушение.

Механизм тушения паром таков, что при 35% объемном содержании пара пламенное горение

прекращается из-за низкого объемного содержания (менее 16%) кислорода. Улучшение огнетушащего эффекта наблюдается при температуре в помещении более 100°С, что исключает возможность нахождения людей.

Указанные недостатки тушения паром удалось устранить при использовании в качестве огнетушащего средства водной среды в метастабильном фазовом состоянии (ВСМФС).

Этот термин используется для воды, полученной в установке за счет “мгновенного перехода” в область метастабильного состояния и последующего взрывного вскипания. После такого процесса вода приобретает уникальные свойства не только за счет получения капель микронного размера, но и за счет изменения структуры воды.

Вода приобретает свойства аналогичные тем, которые в природе вода приобретает в поровых породах при высоких температурах и давлениях [1]. Сущность способа получения уникальных свойств ВСМФС, заключается в том, что пресная вода вследствие её нагревания в специальном теплообменнике при определенном сочетании температуры (более 165°С) и давления (более 1,6 МПа) изменяет свои свойства (табл. 1).

Таблица 1 – Свойства воды при разных температурах

Температура воды	Давление на линии насыщения	Плотность	Удельная энтальпия	Теплоемкость	Динамическая вязкость
°С	бар	кг/м <sup>3</sup>	кДж/кг	кДж/(кг·°С)	кг/(м·с)
20.0	0.0002385	1000.0	83.9	4.182	0.001003
100.0	1.013	958.05	419.1	4,194	0.000282
170.0	7.920	897.21	719.1	4.312	0.000159
200.0	15.551	864.58	852.4	4.401	0.000134
250.0	39.776	799.05	1085.8	4.637	0.000106

После возвращения к обычным атмосферным условиям такая вода некоторое время находится в особом, так называемом, метастабильном состоянии. Это состояние проявляется в повышенной растворяющей способности карбонатов, сульфатов, силикатов и других соединений, а также в способности длительно удерживать в своем составе аномальные количества растворенного вещества (больше в 300...500 раз) и значительно повышать или понижать кислотность [2-9]. Такая вода в работе академика Летникова Ф.А. [1] названа активированной, а сам процесс — температурной активацией. Для обозначения ВСМФС также используется термин – температурно-активированная вода (ТАВ).

При подаче ВСМФС через стволы-распылители, в которых давление воды быстро (за несколько миллисекунд) уменьшается до атмосферного давления, происходит почти мгновенное вскипание воды. Такое вскипание в работах академика Скрипова В.П. названо взрывным вскипанием [10,11].

После взрывного вскипания одна часть воды переходит в переохлажденный пар (до 30% от массы недогретой воды), а другая часть дробится на капли диаметром 0,01-10,0 мкм [12] и, в результате, формируется струя паро-капельной смеси – струя ВСМФС. Струи ВСМФС витают в воздухе и наблюдателями ошибочно воспринимаются как пар (рис.1).



Рисунок 1 – Струя ВСМФС после взрывного вскипания и образование облака водной среды

ВСМФС долго не осаждается (по экспериментальным данным не менее 20 минут), огибает без осаднения препятствия, не оседает на вертикальных и горизонтальных плоскостях, даже при подаче на горизонтальные поверхности стремится вверх.

Устойчивость ВСМФС и возможность заполнения больших объемов водяным туманом таковы, что при подаче 1,6 кг/с в объем 3200 м<sup>3</sup> 100% влажности удается достичь через три минуты [13].

## 2. Перспективы использования водной среды в метастабильном фазовом состоянии

Технология получения ВСМФС (ТАВ) открывает новые и зачастую непривычные при первом ознакомлении возможности.

Попробуем ответить на два вопроса: первый – можно ли разжечь костер в тумане; второй – почему не замерзают облака, там же отрицательная температура. Оба ответа находятся в особых свойствах воды в метастабильном фазовом состоянии, что позволяет находить непривычные сферы её применения.

Технология получения ВСМФС делает явью получение в нужном месте и управление свойствами водных облаков.

Свойства таких облаков могут быть применены для решения различных задач: обеспечения пожаровзрывобезопасности и подавления горения на открытых пространствах и в замкнутых объемах; сорбции газов; осаднения

аэрозолей (пылей, дымов), аварийно химически опасных веществ (АХОВ) и радиоактивных веществ (РВ); очистки поверхности от углеводородных загрязнений; разрушения снежно-ледовых масс; энергоэффективного тепло-, электро-, водоснабжения аварийных объектов.

Одним из освоенных свойств такого искусственного облака является прекращение пламенного горения различных веществ.

Получение водной среды для тушения пожаров освоено в виде мобильных установок, в настоящее время воплощенных в контейнерном исполнении массой от 5 до 20 тонн, а также в пожарном многоцелевом автомобиле (рис. 2).




Рисунок 2 – Автомобиль пожарный

многоцелевой с установкой получения ВСМФС


Важным преимуществом данной технологии явл

яется возможность подачи особым образом подготовленной водной среды по гибким трубопроводам внешним диаметром до 50 мм и получения из нее в нужном месте и в нужном объеме огнетушащего «облака». «Облако» состоит из пара и капель воды размером от 0,01 до 1 мкм. Массовая доля пара в «облаке» зависит от давления и температуры воды перед соплом-распылителем, а также от конструкции сопла. Комбинируя эти параметры можно получать различные как по составу (соотношению паровой и капельной фаз), так и свойствам «облака». Производительность такой установки позволяет получать до 10 м<sup>3</sup>/с огнетушащего облака, которое заполняя помещения не осаждается десятки минут. При этом жидкой воды расходуется всего 2 килограмма в секунду. Такого размера капли и площади поверхности теплообмена ранее достигать не удавалось (рис. 3).




**Капли спринклера**

- Размер капель - от 100 - до 1000 мкм
- Количество капель в литре воды -  $1,9 \cdot 10^6$
- Суммарная площадь поверхности капель - 0,6 м<sup>2</sup>



**Тонкораспыленная вода**

- Размер капель - 50 - 100 мкм
- Количество капель в литре воды -  $1,9 \cdot 10^{12} - 1,9 \cdot 10^9$
- Суммарная площадь поверхности капель - 60 м<sup>2</sup> - 600 м<sup>2</sup>



**Температурно-активированная вода**

Размер капель - 0,01 - 10 мкм

- Количество капель в литре воды -  $1,9 \cdot 10^{15} - 1,9 \cdot 10^{18}$
- Суммарная площадь поверхности капель - 6000 - 60000 м<sup>2</sup>

Рисунок 3 – Сравнение размеров и суммарной площади поверхности капель

При выходе водной среды в помещение температура струи не более 60 градусов Цельсия, что не опасно для человека (рис. 4-5).



Рисунок 4 – Безопасность струи ВСМФС для человека

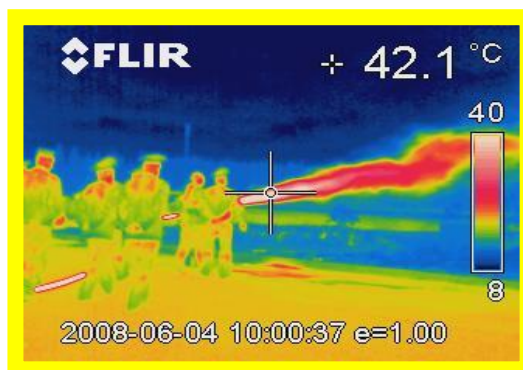


Рисунок 5 – Измерение температуры струи ВСМФС с помощью тепловизора

(крупно показано значение температуры ТАВ в зоне выхода из насадка – 42,1°С)

Экологическая безопасность технологий определяется использованием лишь одного вещества – воды.

Физическая сущность получения ВСМФС сводится к подаче воды под большим давлением (40-100 атм.) в специально разработанный теплообменник. В теплообменнике вода сначала нагревается до температуры 180-300 °С (такую воду принято называть «недогретой»), затем по гибким, металлическим или пластиковым трубопроводам подается к специальным распылителям, где и становится метастабильной перегретой водой только на  $10^{-4}$ – $10^{-9}$  секунды. После взрывного вскипания образуется среда с размером капель 0,01-10 мкм, которые по своим свойствам близки к теплым туманам и облакам [4].

После такого процесса вода приобретает уникальные свойства не только за счет получения капель микронного размера, но и за счет изменения структуры воды.

В результате вскипания одна часть перегретой воды переходит в недогретый пар, а другая часть дробится на капли диаметром менее 10 мкм, эти капли образуют «водяной туман». Диаметр большинства капель «водяного тумана» составляет 0,01-10 мкм, поэтому капли витают в воздухе.

Необходимо отметить, что получение такого мелкого распыла воды традиционным способом (за счет высокого давления или конструкции распылителя) удается добиться только при давлении более 300 атм. или использования специальных сложных распылителей (тонко-распыленная вода).

Подача недогретой воды может быть осуществлена по гибким или жестким (металлическим, пластиковым) трубопроводам на высоту и глубину до 400 метров от установки и на расстоянии до 1 км по горизонтали [12].

Первые эксперименты по использованию струй воды после взрывного вскипания проведены в 1993 году. В 1997 году изготовлен первый автомобиль с установкой получения температурно-активированной воды. В 2007-2008 годах по заказу МЧС разработана конструкция и налажено серийное производство автомобилей пожарных многоцелевых (АПМ). В период с 2008 по 2016 изготовлено и поступило на эксплуатацию 15 АПМ. Успешное использование АПМ при тушении пожаров и ликвидации ЧС широко освещалось в средствах массовой информации.

Достигнуты результаты по использованию АПМ с параметрами воды далекими от критических (температура не более 250 °С и давление не более 10,0 МПа). К настоящему времени в России для нужд МЧС налажено опытное производство автомобилей пожарных многоцелевых (АПМ) с энергетической установкой мощностью 2,3 МВт, теплоносителем в которой является вода с температурой до 250 °С и давлением до 10,0 МПа не прошедшая специальной подготовки. АПМ используется и как

энергетическая установка, и как средство для обеспечения пожаровзрывобезопасности за счет создания условий для взрывного вскипания воды с последующей нуклеацией и коагуляцией парокapпельной смеси, полученной в результате взрывного вскипания [14].

Теплоэнергетическая установка может работать на неподготовленной воде и быстро изменять температуру и давление водной среды в широких пределах.

Технология основана на управляемом изменении свойств воды, водных растворов и водных эмульсий при различных фазовых и метастабильных состояниях. Энергоэффективность и энергосбережение технологии достигается за счет получения и транспортирования водной среды с параметрами близкими к критическим или превосходящими их.

Среда, полученная из недогретой воды, может быть использована для тушения практически всех видов горючих веществ, которые не вступают в химическую реакцию с водой с выделением большого количества тепла или горючих газов. Струи ВСМФС эффективно тушат бензины различных марок, нефтепродукты, спирты, ацетон, другие углеводороды и водорастворимые жидкости, а также твердые материалы: древесину, резину, поливинилхлорид, полистирол.

Тушение поверхностным способом осуществляется стволами с расходом в 7-10 раз меньшими компактных и распыленных струй воды. Удельный расход в 20-30 раз меньше, чем при тушении традиционными струями, за счет высокой проникающей способности и чрезвычайно мелкой капли ВСМФС, что минимизирует пролив воды. Водой без добавок осуществляется тушение электроизоляции, резинотехнических изделий и других твердых горючих материалов (рис. 6) [15].



Рисунок 6 – Поверхностное тушение струями ВСМФС

Наиболее эффективно ВСМФС тушит пожары в замкнутых объемах, так как образует большой объем пара и «водяного тумана», которые эффективно осаждают дым и пары ядовитых веществ, а также вытесняют воздух и тем самым



уменьшают процентное содержание кислорода в зоне горения.

Тушение помещений в зависимости от масштаба пожара можно осуществлять как посредством подачи струи непосредственно в очаг горения, либо, если высокая температура и дым не позволяют видеть очаг, посредством заполнения всего помещения огнетушащей средой. Причем человек не должен находиться в горящем помещении. Достаточно оставить в помещении гибкий трубопровод с соплом и прикрыть дверь.

В отдельных случаях, когда затруднено проникновение в горящее помещение, достаточно отверстия размером с дверной глазок, через которое и будет произведено заполнение помещения и смежных с ним огнетушащим «облаком» в течение короткого времени.

Тушение объемным способом на два порядка эффективнее заполнения помещения пеной. Высокий расход получаемой огнетушащей среды (до 10 м<sup>3</sup>/с), ее проникающая способность и стойкость к осаждению, позволяет подавлять пламенное горение, осуществлять осаждение дыма и снижение температуры в помещениях объемом до 10 000 куб. м за расчетное время тушения пожара [16].

Электропроводность среды температурно-активированной воды на порядок ниже воды в обычном состоянии.

Возможность заполнения помещения пожара и смежных с ним позволяет использовать технологию в стационарных системах автоматического пожаротушения, в том числе судовых (корабельных) АУПТ. Эффект по сравнению с нормативно закрепленными способами тушения пожаров, используемых в пожарной автоматике, достигается за счет в разы меньшего количества подаваемой водной среды, ее дешевизны как средства объемного тушения пожаров, меньшей материалоемкости и трудоемкости монтажа.

Получены параметры объемной интенсивности подавления пламенного горения характерных горючих материалов. При этом отмечается эффект тушения при значительных величинах негерметичности помещения пожара, что достигается за счет избытка огнетушащей среды и ее стойкости во взвешенном состоянии [17].

Для подачи ВСМФС используются специально разработанные гибкие трубопроводы и соответствующая арматура, а также промежуточные и оконечные устройства. Они легко монтируются и демонтируются. Это позволяет путем наращивания без разъединения, сохранять постоянную готовность к действию (работоспособность), в том числе и при перемещении.

Измененная в установке структура воды особым образом воздействует на загрязнения, очищая их. Так, струи ВСМФС эффективно удаляют отложения, в том числе

углеводородные, с поверхностей различных материалов (металл, стекло, пластик) без применения большого давления и технических моющих средств, а также предварительной очистки воды, поступающей в установку. Очистка осуществляется водой без добавок, которая пригодна к повторному использованию, а продукт – к утилизации или рециклингу. При этом расход воды на порядок меньше традиционных способов.

В качестве вспомогательных функций может осуществляться заполнение внутренних объемов облаком, препятствующим образованию взрывопожароопасных концентраций паров и газов [17].

Так же возможно создание завес струями ВСМФС, препятствующих распространению АХОВ или РВ, дыма, пламени и теплового излучения, осаждение опасных для жизни людей токсичных веществ и дыма (продуктов горения). Эффективность по расходу средств на осаждение облака на порядок превышает веерно распыленные струи воды и исключает проскок через завесу. Пропорционально уменьшается отток загрязненной воды.

Применяемая для подачи ВСМФС арматура позволяет осуществлять ликвидацию засоров в коммуникациях, разрушать обледенение конструкций и оборудования сложной конфигурации, не нанося им повреждений.

Установка получения ВСМФС может быть интегрирована в объект - может быть смонтирована на судне (корабле) стационарно в виде многофункциональной системы обеспечения пожаровзрывобезопасности, пожаротушения и дымоосаждения, а также выполнена в виде контейнера, что позволяет доставлять ее любым видом транспорта.

Общим преимуществом технологии является высокая плотность передачи энергии, что позволяет создавать инженерные системы с кратно меньшими объемами перемещаемых сред. Это значительно сокращает инженерные коммуникации. По предварительным подсчетам вес и объем коммуникаций снизится в такой степени, что повлияет на конструктивные и прочностные параметры объекта.

Эксперименты подтвердили, что струи ВСМФС обладают уникальными свойствами, которые позволяют реализовать при тушении пожаров принципиально новые способы пожаротушения, которые не могут быть одновременно реализованы ни одним из известных способов [17]. Данные преимущества ВСМФС как средства прекращения горения и снижения опасных факторов пожара позволяют предложить ВСМФС для объемного способа пожаротушения помещений (отсеков) судов и кораблей [18].

### **Заключение**

Применение инновационной технологии получения и использования ВСМФС для тушения

пожаров может стать новым направлением в обеспечении безопасности и сохранении живучести судов (кораблей). Технология основана на управляемом изменении свойств воды при различных фазовых и метастабильных состояниях.

Технология получения ВСМФС позволяет получать в нужном месте водные облака и управлять их свойствами. Свойства таких облаков могут быть применены как для тушения пожаров, так и для решения других судовых задач. Среда, полученная из недогретой воды,

может быть использована для тушения практически всех видов горючих веществ. Наиболее эффективно ВСМФС тушит пожары в замкнутых объемах, так как образует большой объем пара и “водяного тумана”, которые эффективно осаждают дым, а также вытесняют содержание кислорода в зоне горения. Показана безопасность применения технологии для людей и ее экологичность

### Литература

1. Летников Ф.А. и др. Активированная вода. Новосибирск: Наука, 1976 г.
2. Eggers, J. Physics of liquid jets / J.Eggers, E.Villermaux // Rep. Prog. Phys. – 2008. – V.71. – P. 1-79.
3. Polanco G., Hold A.E., Munday G. General review of flashing jet studies // J. Hazardous Materials. 2010. No. 173. P. 2–18.
4. Skokov V.N., Koverda V.P., Reshetnikov A.V., Skripov V.P., Mazheiko N.A., Vinogradov A.V. // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2003. V. 46. N 10. P. 1879– 1883.
5. Pusztai L. How well do we know the structure of liquid water?// Physica B: Condensed Matter. 2000
6. Chen B., Ivanov I., Klein M.L., Parrinello M. Hydrogen bonding in water//Phys. Rev. Lett. 2003. Vol. 91(21): 215503
7. Sutmann G. Structure formation and dynamics of water in strong external electric fields//J. Electroanal. Chem. 1998. Vol. 450. № 2
8. Wilson K.R., Cavalleri M., Rude B.S. et al. Characterization of hydrogen bond acceptor molecules at the water surface using near-edge x-ray absorption fine-structure spectroscopy and density functional theory//Journal of Physics: Condensed Matter. 2000. Vol. 14. № 8
9. Kusalik P.G., Svishchev I.M. The spatial structure in liquid water//Science. 1994. Vol. 265, 5176
10. Скрипов В.П., Синицын Е.Н., Павлов П.А. и др. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии: справочник. М.: Атомиздат, 1980. 208 с.
11. Skripov V. P., Sinitsin E. N., Pavlov P. A., Ermakov G. V., Muratov G. N., Bulanov N. V., Baidakov V. G. Thermophysical Properties of Liquids in the Metastable (Superheated) State. New York, London. Gordon and Breach Sci. Publ. 1988. -P. 286.
12. Роечко В.В., Кармес А.П. Технология температурно-активированной воды: физическая сущность, история разработки, перспективы развития // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2017. № 3. С. 15-20.
13. Роечко В.В., Пряничников В.А., Кармес А.П., Пряничников А.В., Додонов Е.Д., Храмов С.П. Тушение кабельного коллектора температурно-активированной водой и левитирующей пеной // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: сб. материалов международной научно-практической конференции. М.: Академия государственной противопожарной службы МЧС России. 2012. С. 353–360.
14. Титков А.В., Краснов С.М., Храмов С.П. Использование тонкораспыленной воды при тушении пожаров в объеме помещения // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации: сб. материалов международной научно-практической конференции. М.: Академия государственной противопожарной службы МЧС России. 2015. С. 306–310.
15. Пряничников А.В., Роечко В.В., Бондарев Е.Б. Тушение проливов нефти и нефтепродуктов метастабильными паро-капельными струями воды // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2015. №4. С. 7–12.
16. Бондарев Е.Б. Тушение пожаров на объектах теплоэнергетики температурно-активированной водой // Технологии техносферной безопасности. 2015. № 4 (62). С. 128-133.
17. Храмов С.П. Вода для тушения пожаров // Пожаровзрывобезопасность. 2007. Т. 16. № 4. С. 72-75.
18. Малыгин И.Г., Буравов А.Н. Моделирование процессов управления подготовкой операторов пожарно-технических систем пожарных судов МЧС России // Проблемы управления рисками в техносфере, №2, 2007. С. 87-94.

### References

1. Letnikov F.A. et al. Aktivirovannaja voda [Activated water]. Novosibirsk, Nauka, 1976.
2. Eggers, J. Physics of liquid jets / J.Eggers, E.Villermaux // Rep. Prog. Phys. – 2008. – V.71. – P. 1-79.
3. Polanco G., Hold A.E., Munday G. General review of flashing jet studies // J. Hazardous Materials. 2010. No. 173. P. 2–18.
4. Skokov V.N., Koverda V.P., Reshetnikov A.V., Skripov V.P., Mazheiko N.A., Vinogradov A.V. // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2003. V. 46. N 10. P. 1879– 1883.
5. Pusztai L. How well do we know the structure of liquid water?// Physica B: Condensed Matter. 2000



6. Chen B., Ivanov I., Klein M.L., Parrinello M. Hydrogen bonding in water//Phys. Rev. Lett. 2003. Vol. 91(21): 215503
7. Sutmann G. Structure formation and dynamics of water in strong external electric fields//J. Electroanal. Chem. 1998. Vol. 450. № 2
8. Wilson K.R., Cavalleri M., Rude B.S. et al. Characterization of hydrogen bond acceptor molecules at the water surface using near-edge x-ray absorption fine-structure spectroscopy and density functional theory//Journal of Physics: Condensed Matter. 2000. Vol. 14. № 8
9. Kusalik P.G., Svishchev I.M. The spatial structure in liquid water//Science. 1994. Vol. 265, 5176
10. Skripov V.P., Sinicyn E.N., Pavlov P.A. et al. Teplofizicheskie svojstva zhidkostej v metastabil'nom sostojanii: spravocnik [Thermophysical properties of liquids in a metastable state: a reference book]. Moscow, Atomizdat, 1980. P. 208.
11. Skripov V. P., Sinitsin E. N., Pavlov P. A., Ermakov G. V., Muratov G. N., Bulanov N. V., Baidakov V. G. Thermophysical Properties of Liquids in the Metastable (Superheated) State. New York, London. Gordon and Breach Sci. Publ. 1988. -P. 286.
12. Roenko V.V., Karmes A.P. Tehnologija temperaturno-aktivirovannoj vody: fizicheskaja sushhnost', istorija razrabotki, perspektivy razvitiya [Technology of temperature-activated water: physical essence, history of development, development prospects]. Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashhenie, likvidacija [Fires and emergency situations: prevention, liquidation]. 2017. No. 3. Pp. 15-20.
13. Roenko V.V., Prjanichnikov V.A., Karmes A.P., Prjanichnikov A.V., Dodonov E.D., Hramcov S.P. Tushenie kabel'nogo kollektora temperaturno-aktivirovannoj vodoj i levitirujushhej penoj [Extinguishing the cable collector with temperature-activated water and levitating foam]. Pozharotushenie: problemy, tehnologii, innovacii: sb. materialov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii [Fire-fighting: problems, technologies, innovations: Sat. materials of the international scientific-practical conference]. Moscow. Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2012. Pp. 353–360.
14. Titkov A.V., Krasnov S.M., Hramcov S.P. Ispol'zovanie tonkoraspylennoj vody pri tushenii pozharov v ob#eme pomeshhenija [Use of finely-dispersed water in extinguishing fires in the room volume]. Pozharotushenie: problemy, tehnologii, innovacii: sb. materialov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii [Fire-fighting: problems, technologies, innovations: coll. materials of the international scientific-practical conference]. Moscow. Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. 2015. Pp. 306–310.
15. Prjanichnikov A.V., Roenko V.V., Bondarev E.B. Tushenie prolivov nefii i nefteproduktov metastabil'nymi paro-kapel'nymi strujami vody [Quenching of oil and oil products spills with metastable steam-drop water jets]. Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashhenie, likvidacija [Fire and emergency situations: prevention, liquidation]. 2015. No. 4. Pp. 7–12.
16. Bondarev E.B. Tushenie pozharov na obektah teplojenergetiki temperaturno-aktivirovannoj vodoj [Extinguishing fires at thermal power plants with temperature-activated water]. Tehnologii tehnosfernoj bezopasnosti [Technologies of technospheric security]. 2015. No. 4 (62). Pp. 128-133.
17. Hramcov S.P. Voda dlja tushenija pozharov [Water to extinguish fires]. Pozharovzryvobezopasnost' [Fire and explosion safety]. 2007. T. 16. No. 4. Pp. 72-75.
18. Malygin I.G., Buravov A.N. Modelirovanie processov upravlenija podgotovkoj operatorov pozharno-tehnicheskikh sistem pozharnyh sudov MChS Rossii [Modeling of management processes for the preparation of operators of fire-technical systems of fire courts of the Ministry of Emergencies of Russia]. Problemy upravlenija riskami v tehnosfere [Problems of Risk Management in the Technosphere]. 2007. No. 2. Pp. 87-94.

УДК 614.84.621.3:614.842/.847: 614.842/.844: 614.842/.894

## ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ КЛАССА Е ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ПОМЕЩЕНИЙ СУДОВ (КОРАБЛЕЙ)

**Андрей Дмитриевич Ищенко**

кандидат технических наук,  
профессор кафедры пожарной тактики и службы  
Академия Государственной противопожарной службы МЧС России  
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4.  
E-mail: [adinko@mail.ru](mailto:adinko@mail.ru)

**Тимур Игоревич Чистяков**

преподаватель отделения специальных дисциплин  
ФАУ ДПО Волгодонский учебный центр Федеральной противопожарной службы  
347340, Ростовская область, г. Волгодонск, ул. 8-я Заводская, д. 7.  
E-mail: [timurvdonsk@mail.ru](mailto:timurvdonsk@mail.ru)

**Игорь Геннадьевич Малыгин**

доктор технических наук, профессор  
директор  
ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко  
Российской академии наук  
199178, Санкт-Петербург, В.О., 12 линия, д. 13.  
E-mail: [malygin\\_com@mail.ru](mailto:malygin_com@mail.ru)

**Виктор Викторович Вислогузов**

кандидат технических наук, доцент  
ведущий научный сотрудник лаборатории проблем безопасности транспортных систем  
ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук  
199178, Санкт-Петербург, В.О., 12 линия, д. 13.  
E-mail: [vvvictor72@mail.ru](mailto:vvvictor72@mail.ru)

### Аннотация

В работе приведена проблематика тушения пожаров класса Е энергетических установок и помещений судов (кораблей) при использовании различных огнетушащих веществ. Наиболее подробно проанализировано применение водных сред для тушения пожаров энергетических установок и помещений судов (кораблей) с точки зрения опасности для команды и других участников тушения пожара. Рассмотрено, что использование способов подачи воды и огнетушащих веществ на её основе в виде гетерогенных многофазных потоков с полидисперсной капельной и дисперсионной газовой средами, существенно снижают электропроводность струй и повышают безопасность тушения ими пожаров класса Е. Уделено внимание возможности и перспективам применения в качестве огнетушащего вещества водной среды в метастабильном фазовом состоянии, влиянию среды на безопасность для человека. Представлены способ анализа электропроводности водной среды в метастабильном фазовом состоянии на основе теоретической модели, основанной на методах теории электрических цепей и электротехники, а также модели достижения наименьшей проводимости струй ВСМФС на основе математической модели, описывающей зависимость комплексного сопротивления струй от расхода, давления и температуры недогретой воды. Отмечено, что удельная электропроводимость струи воды в метастабильном фазовом состоянии зависит именно от концентрации капель воды во второй моде - чем концентрация ниже, тем меньше удельная проводимость и выше сопротивление струи, а, следовательно, и безопаснее тушение электроустановок под напряжением.

Рассмотрены бимодальность распределения размера капель воды в получаемой среде и два режима получения водных сред в метастабильном газовом состоянии. Определены перспективы приспособления технологии получения водной среды в метастабильном фазовом состоянии для тушения пожаров класса Е на судах (кораблях).

**Ключевые слова:** пожар, судовая (корабельная) энергетическая установка, водная среда, взрывное вскипание, метастабильное фазовое состояние, активация, коагуляция, пар, конденсация, электроустановка.

## ELECTRIC PROTECTION IN FIRE EXTINGUISHING OF CLASS E ENERGY INSTALLATIONS AND PREMISES OF VESSELS (SHIPS)

**Andrey D. Ishchenko**

cand. tech. sci., the professor of department of fire fighting management and service  
academy of the state fire service of emercom of russia  
Borisa Galushkina, 4, Moscow, 129366

e-mail: [adinko@mail.ru](mailto:adinko@mail.ru)

**Timur I. Chistjakov**

the teacher of the department of special disciplines  
fau dpo volgodonsk training centre of the federal fire service  
8-ya Zavodskaja, 7, Volgodonsk, 347340  
e-mail: [timurvdonsk@mail.ru](mailto:timurvdonsk@mail.ru)

**Igor G. Malygin**

the professor, dr. tech. sci., director  
institute of transport problems n.s.solomenko of the russian academy of sciences  
12-ya liniya VO, 13, Saint-Petersburg, 199178  
e-mail: [malygin\\_com@mail.ru](mailto:malygin_com@mail.ru)

**Victor V. Visloguzov**

the associate professor, cand.tech.sci., leading researcher  
solomenko institute of transport problems of the russian academy of sciences.  
12-ya liniya VO, 13, Saint-Petersburg, 199178  
e-mail: [vvvictor72@mail.ru](mailto:vvvictor72@mail.ru)

### Abstract

The paper presents the problems of extinguishing fires of class E of power plants and premises of vessels (ships) using various extinguishing agents. The most detailed analysis of the use of aqueous media for extinguishing fires of power plants and premises of vessels (ships) from the point of view of danger to the team and other participants in fire extinguishing. It is considered that the use of water supply and extinguishing agents on its basis in the form of heterogeneous multiphase streams with polydisperse drop and dispersive gaseous media, significantly reduce the electrical conductivity of the jets and increase the safety of their fire extinguishing class E. Attention is paid to the possibilities and prospects hostname as an extinguishing agent the aqueous medium in a metastable phase state, the influence of environment on the safety for humans. A method for analyzing the electrical conductivity of an aqueous medium in a metastable phase state is presented on the basis of a theoretical model based on the methods of the theory of electrical circuits and electrical engineering and the model for achieving the lowest conductivity of jets of TAVs on the basis of a mathematical model describing the dependence of the complex resistance of jets on flow, pressure, and temperature of underheated water. It is noted that the specific electrical conductivity of the water jet in the metastable phase state depends on the concentration of water droplets in the second mode, the lower the concentration, the lower the conductivity and the higher the jet resistance, and, consequently, it is safer to extinguish the electrical installations under voltage.

The bimodality of the water droplet size distribution in the resulting medium and two modes of obtaining aqueous media in a metastable gaseous state are considered. The prospects of adapting the technology of obtaining an aqueous medium in a metastable phase state for extinguishing fires of Class E on vessels (ships) are determined.

**Key words:** fire, vessels (ship) power plant, water environment, explosive effervescence, metastable phase state, activation, coagulation, vapor, condensation, electrical installation.

### Введение

Безопасное и эффективное тушение пожаров класса Е в целом и на объектах энергетики остаётся актуальной и далеко не полностью изученной областью пожарной науки. Факторами, стимулирующими исследования в этой области, являются: 1) статистика аварий и пожаров, констатирующая существенный как прямой (порча и выход из строя дорогостоящего электрооборудования) так и косвенный (от перерывов в электро- и тепло-снабжении потребителей) ущерб; 2) высокий риск электротравматизма и даже гибели людей от ударов током при тушении пожаров класса Е; 3) появление новых и перспективных огнетушащих веществ и технических средств их подачи.

Одним из перспективных направлений исследований в этой области остается применение воды и других составов на её основе для тушения пожаров класса Е, так как именно вода является самым распрост-

ранённым и дешёвым огнетушащим веществом (ОТВ) по сравнению с газовыми и порошковыми средствами [1]. Вместе с тем, высокая электропроводность компактных струй воды не позволяет применять её очевидные достоинства при тушении энергетических установок (ЭУ) и помещений судов (кораблей) под напряжением в полной мере [2].

### 1. Возможности тушения водной средой пожаров класса Е энергетических установок и помещений судов

Исследования проведенные в этой области показывают, что использование способов подачи воды и ОТВ на её основе в виде гетерогенных многофазных потоков с полидисперсной капельной и дисперсионной газовой средами, существенно снижают электропроводность струй и повышают безопасность тушения ими пожаров класса Е.

К таким гетерогенным многофазным потокам ОТВ можно отнести струи: распыленной и

тонкораспыленных воды, компрессионной пены (КАФС), водной среды в метастабильном фазовом состоянии (ВСМФС). Особого внимания заслуживает ВСМФС, как наиболее перспективное средство тушения ЭУ под напряжением [3-7].

Таковым его делают некоторые ранее выявленные преимущества перед использованием других ОТВ для тушения пожаров класса Е: 1) малый расход ВСМФС (1-2 л/с) без потери эффективности при тушении пожаров; 2) тушение пожаров всех классов, где вода не вступает в реакцию с веществами усиливающими горение или образующими горючие газы; 3) уникальная возможность реализации объёмного способа тушения из-за свойств ВСМФС, которая может образовывать паро-капельные смеси длительно находящиеся во взвешенном состоянии и огибать препятствия [8]; 4) возможность добавления к ВСМФС дополнительных огнетушащих составов, придающих новые огнетушащие свойства или усиливающие огнетушащий эффект (например: примешивание к ВСМФС пенообразователя).

В публикациях [9, 10] был предложен способ анализа электропроводности струй ВСМФС на основе теоретической модели, основанной на методах теории электрических цепей и электротехники. В частности, было выяснено, что любые токи, протекающие как через тело человека (пожарного работающего с пожарным стволом), так и через насосно-рукавную систему пожарной установки, а также через системы заземления и электрозащитные средства, являются лишь частью суммарного тока, текущего через струю ВСМФС.

Каждый из этих электрических токов ветвей эквивалентной схемы [9] заведомо меньше тока по струе ВСМФС. Исходя из этого, задача сводится к нахождению переменного синусоидального тока частотой 50 Гц (для большинства промышленных ЭУ), протекающего через струю ВСМФС на месте тушения пожара класса Е. В свою очередь, искомый ток можно найти, зная комплексное сопротивление струи ВСМФС:

$$\dot{Z} = f(F; R; L; C) \quad (1)$$

где  $\dot{Z}$  – комплексное сопротивление струи, Ом;  $F$  – частота переменного тока, Гц;  $R$  – активное (резистивное) сопротивление струи, Ом;  $L$  – индуктивность струи, Гн;  $C$  – ёмкость струи, Ф.

Как было выяснено на основе анализа схемы замещения, комплексное сопротивление струи ВСМФС зависит от его активного сопротивления, ёмкости и индуктивности, а те, в свою очередь, от геометрических параметров конических струй ВСМФС ( $y_1$ ,  $\alpha$  и  $l_{полн.}$ ) и от эффективных электрических параметров ( $\rho_{эф.}$ ,  $\varepsilon_{эф.}$ ,  $\mu_{эф. j}$ ):

$$\begin{cases} C = f(y_1; l_{полн.}; \alpha; \varepsilon_0; \varepsilon_{эф.}) \\ L = f(y_1; l_{полн.}; \alpha; \mu_0; \mu_{эф. j}; \mu_e) \\ R = f(y_1; l_{полн.}; \alpha; \rho_{эф.}) \end{cases} \quad (2)$$

где  $l_{полн.}$  – длина струи ВСМФС от среза сопла ствола до ЭУ, м;  $\alpha$  – угол раскрытия струи, рад;  $y_1$  – радиус среза сопла ствола, м;  $\rho_{эф.}$  – эффективное удельное сопротивление струи, Ом·м;  $\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м;  $\varepsilon_{эф.}$  – эффективная относительная диэлектрическая проницаемость струи ВСМФС;  $\mu_0 \approx 1,25663706 \cdot 10^{-6}$  – абсолютная магнитная проницаемость вакуума, Гн/м;  $\mu_e$  – относительная магнитная проницаемость внешней среды;  $\mu_{эф. j}$  – эффективная относительная магнитная проницаемость струи ВСМФС.

Нахождение геометрических параметров струй ВСМФС не представляет труда и может быть сделано на основе анализа фото и видеоматериалов фиксации эксперимента по подаче струй ВСМФС из насадков. Нахождение эффективных электрических параметров струй ВСМФС представляет собой более сложную задачу и требует дальнейшего теоретического анализа физических процессов, протекающих в двухфазных гетерогенных струях ВСМФС с полидисперсной водокапельной и монодисперсионной газопаровой несущей средой. Данная публикация посвящена именно этой проблеме и является логическим продолжением метода, предложенного в [9, 10].

Физические процессы, протекающие при получении струй ВСМФС из недогретой до температуры насыщения воды (далее – недогретая вода), являются весьма сложными для математического моделирования, но теоретически могут быть решены методами, изложенными в [11-13]. При выборе той или иной методики крайне важна постановка общей задачи, а также выбор начальных и граничных (краевых) условий.

Например, если поставить задачу оптимизации параметров недогретой воды, подаваемой к насадкам для тушения пожара класса Е, с целью достижения наименьшей проводимости струй ВСМФС, то необходимо создать математическую модель описывающую зависимость комплексного сопротивления струй ВСМФС от расхода  $Q$ , давления  $P$  и температуры  $T$  недогретой воды на входе в насадки.

Если при табулировании функции  $\dot{Z} = f(Q; P; T)$  удастся найти её максимум (при варьировании значений расхода  $Q$ , давления  $P$ , температуры  $T$ , которые должны лежать в реализуемых границах для установки пожаротушения ВСМФС (УПВСМФС) и без ущерба для огнетушащей способности), то можно вести речь о разработке технического обоснованного режима подачи ВСМФС для тушения пожаров класса Е.

Решение такой задачи связано с аналитическим описанием математическими зависимостями процессов взаимодействия капельной и паровой среды (испарение, конденсация, дробление и коагуляция), как в самих струях ВСМФС, так и в соплах насадков для их получения (сопло Лавалья, сопло с острой кромкой, сопло с удлиненной проточной частью). При этом от учёта всех физических особенностей получения струй ВСМФС из недогретой воды зависит точность разрабатываемого метода и применимость его на практике.

Чрезмерное упрощение модели может привести к неприемлемой погрешности и неприменимости метода в целом. Вместе с тем, учёт всех многообразных физических процессов, протекающих при получении и использовании струй ВСМФС для тушения пожаров класса Е, в совокупности с задачей нахождения оптимального режима пожаротушения, может привести к очень громоздким аналитическим выражениям, моделирование которых численными методами окажется невозможным или по крайней мере весьма затруднительным.

Таким образом, от правильности поставленной задачи и создания упрощённой модели, с заданной точностью, описывающей процесс тушения пожаров класса Е струями ВСМФС, во многом зависит успешное достижение результата.

Оптимальной задачей может стать анализ применимости насадков для тушения пожаров класса Е при различных напряжениях ЭУ и нахождение безопасных расстояний подачи ВСМФС на ЭУ.

При этом в качестве исходных параметров работы УПВСМФС должны рассматриваться её стандартные режимы подачи недогретой воды, а именно ВСМФС 40 (расход  $Q$  от 0,4 до 2,0 л/с при температуре  $T$  от 165 до 195°C и избыточном давлении  $P$  от 1,3 до 2,0 МПа) и ВСМФС 100 (расход  $Q$  от 0,4 до 1,38 л/с при температуре  $T$  от 165 до 280°C и избыточном давлении  $P$  от 1,3 до 6,0 МПа) [14].

## 2. Основы теории электрического сопротивления струй водной среды в метастабильном фазовом состоянии

Комплексное сопротивление струй ВСМФС зависит от их эффективных переменных: удельного сопротивления  $\rho_{эф}$ , относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{эф}$  и относительной магнитной проницаемости  $\mu_{эф,j}$ . Дальнейшее исследование должно быть сосредоточено на нахождении именно этих параметров. Для того чтобы найти аналитические выражения для их описания необходимо проанализировать состав и структуру струй ВСМФС, а также способ их получения, например с помощью сопла Лавалья.

Некоторые аспекты получения из недогретой воды гетерогенных двухфазных парокапельных потоков с помощью сопла Лавалья описаны в [11,

12, 15]. В случае с ВСМФС, недогретая вода, по рукавным линиям высокого давления поступает к суживающейся части сопла Лавалья, которым оконечен, например, ствол – пика (рис. 1).

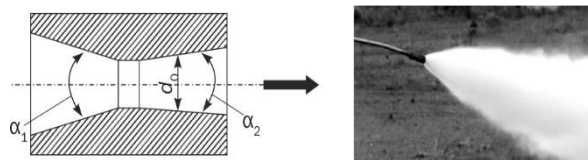


Рисунок 1 - Насадок ствола-пики с укороченным соплом Лавалья и коническая форма струи ВСМФС:

$\alpha_1$  – угол расточки суживающейся части,

$\alpha_2$  – угол расширяющейся части,  $d_0$  – диаметр сопла.

Протекая по рукавам высокого давления, в недогретой воде на примесях и растворённом газе, возникают центры зародышеобразования пузырьков пара. До выхода из суживающейся части сопла Лавалья недогретая вода остаётся в жидком состоянии, так как из-за высокого давления в рукавной линии зародившиеся пузырьки пара, не достигнув критического сечения в основном схлопываются. После достижения расширяющейся части сопла, вдоль его оси, образуется жидкое ядро метастабильной воды, насыщенное растущими пузырьками пара. В расширяющейся пристенной области сопла на шероховатостях стенок возникает кипение и парообразование. Получившийся насыщенный пар быстро остывает и в некотором количестве конденсируется. Сконденсированная, таким образом вода имеет свойства дистиллированной жидкости, наличие ионов и примесей в которой минимально. Вместе с тем, центральное жидкое ядро, насыщенное пузырьками пара, превращается в поток водяной пены, при разрушении пузырьков которой, образуются не только пар, но и более крупные капли воды. Эти капли воды обладают повышенной проводимостью (из-за присутствия ионов растворённых веществ) по сравнению с каплями, образовавшимися из насыщенного пара в процессе его конденсации. Длина центрального вспененного ядра зависит от степени недогрева воды и может выходить за срез сопла, в случае если его расширяющаяся часть короткая (как в случаях с насадками для подачи ВСМФС). Таким образом, на выходе из сопла получается паро-капельный поток с бимодальным объемным (массовым) распределением капель ВСМФС (рис. 2).



Рисунок 2 - Гистограмма и интегральная кривая объёмного (массового) распределения (содержания) капель сконденсированного пара и воды по размерам для сопла Лавала при температуре недогретой воды перед соплом 170° С.

Первая мода (на рис. 2 радиус частиц воды от 0,01 до 0,4 мкм) с более мелкими каплями образуется в результате конденсации насыщенного газообразного пара, а вторая мода (на рис. 2 радиус частиц воды от 0,4 до 10,0 мкм) в результате дробления разрушающейся пленки воды вспененного центрального ядра. На гистограмме видно, что 90% струи составляют газообразный пар и мельчайшие сконденсированные капли дистиллированной воды. Остальные 10 % это капли неиспарившейся и насыщенной солями воды.

Для других типов насадков или других параметров воды перед соплом насадков, объёмное (массовое) распределение капель будет отличаться от рисунка 2. Как паровая, так и водяная моды плотности распределения частиц носят случайный характер и могут быть аналитически описано дифференциальным массовым (объёмным) логарифмически нормальным или гамма распределением [16, 17]. Суммирующая кривая дифференциального распределения для обеих мод будет иметь вид:

$$g_{\Sigma}(lg(r)) = (1 - a) \cdot g_1(lg(r)) + a \cdot g_2(lg(r)) \quad (3)$$

где  $g_1(lg(r))$  – объёмная (массовая) плотность распределения капель паровой фазы, в зависимости от логарифма радиуса капель;  $g_2(lg(r))$  – объёмная (массовая) плотность распределения капель водяной фазы, в зависимости от логарифма радиуса капель;  $r$  – радиус капли, мкм;  $a$  – коэффициент, показывающий насколько вторая мода больше первой.

Получившееся бимодальное распределение верно при условии нормирования на единицу, а в случае с плотностью распределения частиц (рис. 2) на 100%. Таким образом:

$$\int_0^{\infty} g_{\Sigma}(lg(r)) d(lg(r)) = 1 \quad (4)$$

На рисунке 2 дифференциальная плотность распределения представлена в виде

гистограммы зеленого цвета, а интегральная – в виде кривой красного цвета. При этом шкала по оси ординат представлена в логарифмическом масштабе, то есть с каждым делением приращение радиуса капель увеличивается на величину 1,195.

Гистограмма дифференциального и кривая интегрального объёмного (массового) распределения капель по размерам в струях ВСМФС получены в результате исследования на экспериментальной установке [18, 19] струйных течений на уменьшенных моделях (по сравнению с соплами насадками для подачи ВСМФС) сопла Лавала и сопла с острой кромкой в масштабном эксперименте. Измерения производились на расстоянии 0,6 м от среза сопел. При этом объёмное (массовое) распределение (без учёта логарифмической шкалы диаметров капель) соответствует формуле:

$$g(r) = \frac{r^3 \cdot f(r)}{\int_0^{\infty} r^3 \cdot f(r) d(r)} \quad (5)$$

где  $f(r)$  – счётное распределение капель по радиусам.

При переносе результатов экспериментов на реальные струи ВСМФС необходимо увеличить геометрические размеры на масштабный коэффициент  $k$ . Гистограмма дифференциального и кривая интегрального распределения (рис. 2) не дают представления о механизме физического взаимодействия паровой и капельной фаз в струе ВСМФС. Они лишь показывают объёмное (массовое) распределение капель по размерам и их соотношения в некоем элементарном объёме, середина центральной оси которого находится на расстоянии  $l_{полн.i} = 0,6k$  м от среза сопла ствола. При этом, объёмная концентрация капель водяной фазы, может быть найдена из выражения:

$$C_v(l_{полн.i}) = \frac{V_{vi}(l_{полн.i})}{V_{vi}(l_{полн.i}) + V_{ni}(l_{полн.i})} \quad (6)$$

где  $V_{vi}(l_{полн.i})$  – объём всех капель водяной фазы (второй моды) на расстоянии от среза сопла ствола  $l_{полн.i}$  м<sup>3</sup>;  $V_{ni}(l_{полн.i})$  – объём всех капель и газа паровой фазы (первой моды) на расстоянии от среза сопла ствола  $l_{полн.i}$  м<sup>3</sup>.

Учитывая, что полный объём системы равен:

$$V_{сист.i}(l_{полн.i}) = V_{vi}(l_{полн.i}) + V_{ni}(l_{полн.i}) \quad (7)$$

тогда объём всей конической струи ВСМФС будет соответствовать сумме элементарных объёмов по всей длине  $l_{полн.}$ :

$$V_{стр.}(l_{полн.}) = \sum_i V_{сист.i}(l_{полн.i}) \quad (8)$$



Принимая во внимание (3-8), а также что величина интегрального объёмного распределения капель  $G(lg(r))$  на рисунке 2 нормированная на 100%, будет справедливым выражение:

$$C_v(l_{полн.i}) = \frac{100\% - G_1(lg(r))}{100\%} \quad (9)$$

где  $G_1(lg(r))$  – нормированное интегральное объёмное (массовое) распределение пара первой моды.

Для нашего случая (рис. 2):  $G_1(lg(r)) = 90\%$ , а  $C_v(l_{полн.i}) = 0,1$ .

С учётом скорости каждой отдельной капли в струе ВСМФС, её импульса, возможных процессов испарения, конденсации, коагуляции и дробления, можно предположить изменение процентных соотношений объёмного (массового) содержания капель с ростом расстояния от среза сопла ствола и до поверхности ЭУ. Поэтому, концентрация капель в струе будет зависеть от расстояния  $C_v \sim l_{полн.}$ . Установить эту зависимость можно опытным путём, а найденное в соответствии с рисунком 2 и выражением (9) значение  $C_v(l_{полн.i})$  будет являться реперной точкой. Если перечисленные процессы в струе ВСМФС имеют пренебрежимо малое влияние на концентрацию капель, то зависимость  $C_v$  от  $l_{полн.}$  будет иметь линейный характер и межфазными взаимодействиями можно пренебречь. В противном случае, при нелинейном характере зависимости (не зависящей от «конусообразности» струй ВСМФС), этими процессами пренебрегать нельзя.

Основание полагать, что концентрация капельной фазы в общем объёме струи ВСМФС имеет нелинейный характер, даёт тот факт, что струя имеет неоднородности. В ней можно выделить, как минимум три участка.

I – участок, содержащий центральное ядро вспененной пузырьками пара метастабильной воды, который может выходить на определённое расстояние за сопло ствола для подачи ВСМФС и иметь повышенную электрическую проводимость. Этот участок образует электропроводящий кластер, связи отдельных пузырьков в котором определяют пониженное эффективное удельное сопротивление  $\rho_{эф.}$  струи ВСМФС. На этом участке массовая (объёмная) концентрация водяных капель будет выше концентрации пара  $C_v \approx 0,99 \dots 0,3$ .

II – участок отдельно существующих капель воды в несущей среде насыщенного мокрого пара, импульсы капель которого, позволяют сохранять их относительно прямолинейное движение и говорить о ламинарности потока. Этот участок с концентрацией капель  $C_v \approx 0,3 \dots 0,02$ .

III – участок разрушения струи, где скорость капель падает настолько, что самые крупные из них коагулируют и выпадают под действием силы тяжести на подстилающую поверхность

(палубу), а остальные теряют скорость и закручиваются в турбулентный поток, который даёт возможность окружающему воздуху проникнуть в струю ВСМФС разбавляя её. Этот участок с концентрацией капель  $C_v \leq 0,02$  (рис. 3).

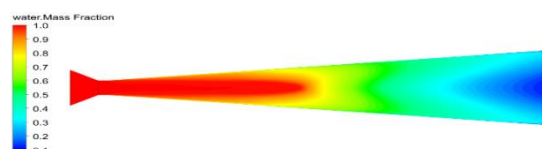


Рисунок 3 - Объёмное (массовое) распределение (содержание) капель сконденсированного пара и воды по размерам для сопла Лавала при температуре недогретой воды перед соплом  $170^\circ \text{C}$ .

Удельная электропроводимость струи ВСМФС зависит именно от концентрации капель воды во второй моде. Чем концентрация ниже, тем меньше удельная проводимость и выше сопротивление струи ВСМФС, а, следовательно, и безопаснее тушение ЭУ под напряжением.

Гораздо меньшие по сравнению с тонкораспыленной водой (ТРВ) (диаметр капель от 10 до 100 мкм) капли ВСМФС (диаметр капель от 0,01 до 10 мкм) и их объёмная концентрация в струе предполагают и более высокое электрическое сопротивление струй ВСМФС по сравнению с ТРВ.

### 3. Экспериментальное исследование электрического сопротивления струй водной среды в метастабильном фазовом состоянии

По сравнению с ТРВ электропроводность струй ВСМФС гораздо ниже, то есть при тушении ЭУ под напряжением вероятность получить поражение электрическим током через струю ВСМФС также невелика. Для подтверждения этой гипотезы и были проведены эксперименты со струями ВСМФС получаемыми из недогретой пресной воды.

Суть методики эксперимента заключается в том, что на основе опытных данных полученных из нескольких десятков серий экспериментов по исследованию изменения тока утечки по струе на землю, в зависимости от различных расстояний до мишени, напряжений и типов стволов, составляются зависимости с эмпирическими коэффициентами. При этом в основе методики лежит обработка полученных данных регрессивным анализом и получение искомых зависимостей по методу «средних квадратов». Затем полученная зависимость тока утечки, через тело человека на землю ограничивается на уровне 0,5 мА и исходя из этого, а также удельного сопротивления ОТВ, его типа, напряжения ЭУ, способа и технического средства подачи ОТВ, выбирается минимальное безопасное расстояние до ЭУ.

Стенд собран на основе аппарата испытания диэлектриков АИД-70М с мишенью из металлической сетки на опорных изоляторах ИОС-110-400 и опорой для установки пожарного ствола на изоляторах ИОМ – 10 (рис. 4).

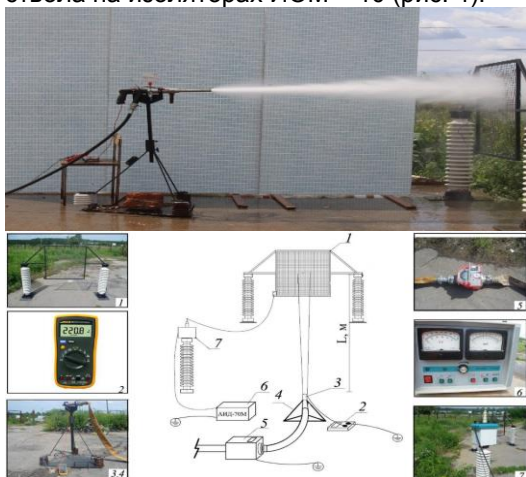


Рисунок 4 - Схема и внешний вид элементов экспериментальной установки для определения тока утечки по струе огнетушащих веществ.

На рисунке 4 представлены: 1 – мишень; 2 – цифровой мультиметр; 3 – испытываемый пожарный ствол; 4 – изолированная опора для установки пожарного ствола; 5 – расходомер; 6, 7 – аппарат испытания диэлектриков АИД-70М.

Принципиальная схема эксперимента представлена на рисунке 5.

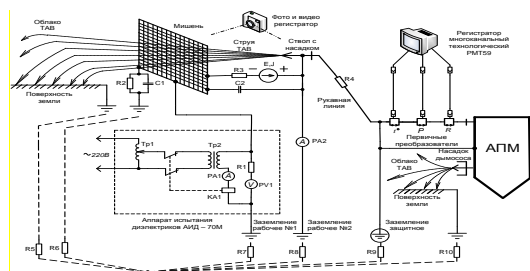


Рисунок 5 - Схема эксперимента определения тока утечки по струе огнетушащих веществ.

На схеме (рис. 5) помимо приборов изображены цепи электрического тока и их сопротивления  $R_1 - R_{10}$ , а также паразитные ёмкости между землей и мишенью  $C_1$ , мишенью и стволом  $C_2$ . Показаны первичные преобразователи (датчики) температуры, давления и расхода ВСМФС, соединенные с регистратором многоканальным технологическим РМТ 59. При измерениях фиксировался ток утечки на землю от мишени через струю ВСМФС и пожарный ствол, по показаниям микроамперметра РА2. Напряжение и сила тока в цепи мишени отслеживались по показаниям

миллиамперметра РА1 и киловольтметра РВ1 прибора АИД-70М.

Эксперименты показали следующие результаты:

1. Даже при расстоянии 0,5 м между стволом для подачи струи ВСМФС и электрической мишенью при напряжении между ними 30 кВ, ток по струе не превышает максимальный ток аппарата АИД-70М в 20 мА и не вызывает электрического пробоя и срабатывания токовой защиты КА1.

2. При ступенчатом увеличении напряжения от 0 до 30 кВ с шагом в 10 кВ сила тока, протекающая через РА2 на землю, падает (!), а не растёт с ростом напряжения, как можно было бы предположить.

3. С ростом интенсивности подачи струи ВСМФС на мишень сила тока, протекающая через РА1 на землю, уменьшается (!), как и при увеличении напряжения.

4. При увеличении расстояния от ствола до мишени сила тока, протекающая через РА2 на землю, увеличивается (!), а не уменьшается, как на первый взгляд должно быть.

5. Надо отметить, что во всех случаях сила тока находилась в пределах значений от 0,1 до 0,4 мА, то есть, если бы ствол для подачи ВСМФС держал в руках человек, протекающий через его тело на палубу (землю) ток не достиг бы даже значения ощутимого тока, то есть величины 0,5 мА.

### Заключение

Эксперименты показывают, что с ростом температуры и давления недогретой воды, концентрация в струе ВСМФС неиспарившихся капель уменьшается, а газообразного пара – растёт. При этом насыщенность ионами примесей неиспарившихся капель воды возрастает настолько, что они превращаются в твёрдые соли.

В режиме «ВСМФС 100» бимодальное распределение капель воды в струе ВСМФС преобразуется в унимодальное распределение сконденсированных мельчайших дистиллированных капель водяного пара и собственно газообразного пара. При этом в несущем потоке присутствует некоторый процент мелкодисперсных порошкообразных частиц кристаллизованных солей и примесей.

Составляющие части струи обладают минимальной электропроводностью, а струя ВСМФС в целом обладает свойствами аэрозольного ОТВ. Процентное содержание кристаллических солей можно существенно увеличить, если использовать для получения ВСМФС морскую воду. Это бесспорное преимущество ВСМФС перед другими ОТВ при применении его для тушения пожаров класса Е энергетических установок и помещений судов (кораблей).

Таким образом, при использовании морской воды для тушения пожаров класса Е возможна

реализация режима работы УПВСМФС, при котором образуются неэлектропроводные аэрозольные струи ОТВ, содержащие в своём составе газообразный пар, мельчайшие капли дистиллированной воды и мелкодисперсные порошки кристаллических солей (рис. 6).

Класс пожара	Огнетушащее вещество ВСМФС			
	Пресная вода	Морская вода	Пресная вода	Морская вода
	Режим ВСМФС 40		Режим ВСМФС 100	
A	+++	+++	++	++
B	++	++	++	+++
C	+	+	++	+++
D	-	-	-	+++
E	++	+	+++	++++

Рисунок 6 - Возможность и эффективность тушения пожаров различных классов струями ВСМФС.

Интерес для исследования представляют свойства (в том числе и электропроводности) струй ВСМФС, получаемых из смеси недогретой морской воды и химических добавок, повышающих эффективность пожаротушения. К таким веществам можно отнести, например, ингибиторы горения (хладоны) или пенообразователи.

### Литература

1. Ishchenko A.D., Roenko V.V., Malygin I.G. Fire hazards and fire extinguishing features of power plants and compartments of ships // Marine intellectual technologies. Scientific journal № 1 (39) V. 1 2018. P. 86-94. www.morintex.ru. ISSN 2073-7173
2. Малыгин И.Г., Буравов А.Н. Моделирование процессов управления подготовкой операторов пожарно-технических систем пожарных судов МЧС России // Проблемы управления рисками в техносфере, №2, 2007. С. 87-94.
3. Lienhard J.H., Day J. B. The breakup of superheated liquid jets // Trans. ASME D: J. Basic Engng. 1970. No. 92. P. 515-519.
4. Wildgen A., Straub J. The boiling mechanism in superheated free jets // Int. J. Multiphase Flow. 1989. Vol. 15, No. 2. P. 193-207.
5. Kurschat Th., Chaves H., Meier G.E.A. Complete adiabatic evaporation of highly superheated liquid jets // J. Fluid Mech. 1992. Vol. 236. P. 43-59.
6. Simous-Moreira J.R., Vieira M.M., Angelo E. Highly expanded flashing liquid jets // J. Thermophysics Heat Transfer. 2002. Vol. 16, No. 3. P. 415-424.
7. Polanco G., Hold A.E., Munday G. General review of flashing jet studies // J. Hazardous Materials. 2010. No. 173. P. 2-18.
8. Роечко В.В., Храмов С.П., Сегаль М.Д., Краснов С.М. Объемный способ пожаротушения кабельных сооружений температурно-активированной водой // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2017. №1. С. 40-50.
9. Чистяков Т.И. Применение теории цепей при анализе процессов тушения электроустановок под напряжением на объектах энергетики // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2016. № 4. С. 13-21.
10. Чистяков Т.И. Влияние геометрических параметров струй температурно-активированной воды на комплексное сопротивление при тушении пожаров класса Е // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2017. № 2. С. 12-21.
11. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергоиздат, 1981. 472 с.
12. Барилевич В.А. Основы термогазодинамики двухфазных потоков и их численное решение: учебное пособие. СПб.: Изд. Политехнического университета, 2009. 425 с.
13. Великанова Ю.В. Гидромеханика многофазных сред: учебное пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2009. 166 с.
14. Чистяков Т.И., Храмов С.П., Пряничников А.В. и др. Конструкция, функционирование и аспекты применения автомобиля пожарного многоцелевого: учеб. пособие / под общ. ред. В. В. Бачкала. Волгодонск: Волгодонский учебный центр ФПС МЧС России, 2015. 203 с.
15. Прокопов М.Г. Теплофизическое моделирование рабочего процесса жидкостно-парового струйного компрессора: дис. ... канд. тех. наук. Сумы: Сумский государственный университет, 2011. 188 с.
16. Архипов В.А., Усанина А.С. Движение частиц дисперсной фазы в несущей среде: учебное пособие. – Томск: Изд. дом Томского государственного университета, 2014. – 252 с.
17. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. 3-е изд., перераб. Л.: Химия, 1987. 264 с.
18. Алексеев В.Б., Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А., Мариничев Д.В., Низовский В.Л., Низовский Л.В. Распыление перегретой воды: практика исследования сложных дисперсионных структур // Теплофизика высоких температур. 2014. - № 3. С. 456- 462.

19. Алексеев В.Б., Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А., Мариничев Д.В., Низовский В.Л., Низовский Л.В. Впрыск высокодисперсной воды в компрессор ГТУ: теплофизические исследования и инженерные проблемы // Тепловые процессы в технике. 2011. - №11 С. 490–499.

### References

1. Ishchenko A.D., Roenko V.V., Malygin I.G. Fire hazards and fire extinguishing features of power plants and compartments of ships // Marine intellectual technologies. Scientific journal № 1 (39) V. 1 2018. P. 86-94. www.morintex.ru. ISSN 2073-7173
2. Malygin I.G., Buravov A.N. Modelirovanie processov upravlenija podgotovkoj operatorov pozharo-technicheskikh sistem pozharных судов MChS Rossii [Modeling of management processes for the preparation of operators of fire-technical systems of fire courts of the Ministry of Emergencies of Russia]. Problemy upravlenija riskami v tehnosfere [Problems of Risk Management in the Technosphere], 2007. No. 2. Pp. 87-94.
3. Lienhard J.H., Day J. B. The breakup of superheated liquid jets // Trans. ASME D: J. Basic Engng. 1970. No. 92. P. 515–519.
4. Wildgen A., Straub J. The boiling mechanism in superheated free jets // Int. J. Multiphase Flow. 1989. Vol. 15, No. 2. P. 193–207.
5. Kurschat Th., Chaves H., Meier G.E.A. Complete adiabatic evaporation of highly superheated liquid jets // J. Fluid Mech. 1992. Vol. 236. P. 43–59.
6. Simous-Moreira J.R., Vieira M.M., Angelo E. Highly expanded flashing liquid jets // J. Thermophysics Heat Transfer. 2002. Vol. 16, No. 3. P. 415–424.
7. Polanco G., Hold A.E., Munday G. General review of flashing jet studies // J. Hazardous Materials. 2010. No. 173. P. 2–18.
8. Roenko V. V. Ob#emnyj sposob pozharotushenija kabel'nyh sooruzhenij temperaturno-aktivirovannoj vodoj [Volume method of fire extinguishing of cable structures with temperature-activated water]. V. V. Roenko, S. Hramcov, M. D. Segal', S. M. Krasnov Problemy bezopasnosti i chrezvychajnyh situacij [Problems of safety and emergency situations]. 2017. No. 1. Pp. 40–50.
9. Chistjakov T. I. Primenenie teorii cepej pri analize processov tushenija jelektroustanovok pod naprjazheniem na ob#ektah jenergetiki [Application of the theory of circuits in the analysis of quenching of electrical installations under voltage at power plants]. Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashhenie, likvidacija [Fires and emergency situations: prevention, liquidation]. 2016. No. 4. Pp. 13–21.
10. Chistjakov T. I. Vlijanie geometricheskikh parametrov struj temperaturno-aktivirovannoj vody na kompleksnoe soprotivlenie pri tushenii pozharov klassa E [Influence of geometric parameters of jets of temperature-activated water on complex resistance in extinguishing fires of class E] Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashhenie, likvidacija [Fires and emergency situations: prevention, liquidation]. 2017. No. 2. Pp. 12–21.
11. Dejch M. E., Filippov G. A. Gazodinamika dvuhfaznyh sred [Gas dynamics of two-phase media]. Moscow, Jenergoizdat, 1981. 472 p.
12. Barilovich V. A. Osnovy termogazodinamiki dvuhfaznyh potokov i ih chislennoe reshenie: uchebnoe posobie [Gas dynamics of two-phase media]. Saint-Petersburg, Izd. Politehnicheskogo universiteta, 2009. 425 p.
13. Velikanova Ju. V. Gidromehanika mnogofaznyh sred: uchebnoe posobie [Hydromechanics of multiphase media: a textbook]. Samara, Samara State Technical University, 2009. 166 p.
14. Chistjakov T. I. Konstrukcija, funkcionirovanie i aspekty primenenija avtomobilja pozharного mnogocelevogo : ucheb. posobie [The design, functioning and aspects of the use of a multi-purpose fire vehicle: tutorial]. T. I. Chistjakov, S. Hramcov, A. V. Prjanichnikov et al. under the general editorship V. V. Bachkala. Volgodonsk, Volgodonsk Training Center of the Federal Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia, 2015. 203 p.
15. Prokopov M. G. Teplofizicheskoe modelirovanie rabocheho processa zhidkostno-parovogo strujного компрессора. Cand. tech. nauk, Diss.[Prokopov MG Thermophysical modeling of the working process of liquid-steam jet compressor. Candidate of Engineering Sciences, Diss.]. Sumy, Sumy state University, 2011. 188 p.
16. Arhipov V. A., Usanina A. S. Dvizhenie chastic dispersnoj fazy v nesushhej srede: uchebnoe posobie [Movement of particles of a dispersed phase in a carrier medium: a textbook]. Tomsk, Izd. dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2014. 252 p.
17. Kouzov P. A. Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennyh pylej i izmel'chjonnyh materialov.3-e izd., pererab[Fundamentals of the analysis of the disperse composition of industrial dusts and crushed materials. 3rd ed., red.].L.: Himija, 1987.264 p.
18. Alekseev V.B., Zalkind V.I., Zejgarnik Ju.A., Marиничев D.V., Nizovskij V.L., Nizovskij L.V. Raspylenie peregretoj vody: Praktika issledovaniya slozhnyh dispersionnyh struktur [The practice of studying complex dispersion structures]. Teplofizika vysokih temperatur [Thermophysics of high temperatures]. 2014. № 3. P. 456–462.
19. Alekseev V.B., Zalkind V.I., Zejgarnik Ju.A., Marиничев D.V., Nizovskij V.L., Nizovskij L.V. Vпрыск vysokodispersnoi vody v компрессор GTU: teplofizicheskie issledovaniya i inzhenernye problemy [Water injection into the compressor of GTU: thermophysical research and engineering problems]. // Thermal processes in technology. 2011. - №11 С. 490–499

УДК 621.438.1 ... 621.438.2

## ПОТЕРИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ВЕНТИЛЯЦИЮ ГАЗА В ПАРЦИАЛЬНЫХ МАЛОГАБАРИТНЫХ ОСЕВЫХ ТУРБИННЫХ СТУПЕНЯХ

**Юрий Васильевич Соломахин**

доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных процессов и технологий  
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса  
690014, г. Владивосток, ул. Гоголя 41  
e-mail: [rector@vvsu.ru](mailto:rector@vvsu.ru)

**Людмила Петровна Цыганкова**

доцент кафедры судовой энергетики и автоматики  
Дальневосточный Федеральный Университет  
690091 г. Владивосток, ул. Суханова, 8  
e-mail: [rector@vvsu.ru](mailto:rector@vvsu.ru)

**Андрей Юрьевич Фершалов**

кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных процессов и технологий  
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса  
690014, г. Владивосток, ул. Гоголя 41  
e-mail: [rector@vvsu.ru](mailto:rector@vvsu.ru)

### Аннотация

Работа посвящена оценке величины вентиляционных потерь кинетической энергии осевых малогабаритных турбинных ступеней, используемых в судовых главных и вспомогательных механизмах. В статье рассмотрены вопросы, связанные с вентиляцией лопатками рабочего колеса рабочего тела (газа или пара) в области между рабочим колесом и сопловым аппаратом, вызванной наличием неактивной дуги у рабочего колеса из-за парциального подвода рабочего тела к проточной части рабочего колеса, приводящей к дополнительным потерям кинетической энергии потока при использовании сопловых аппаратов с малыми (менее 12°) углами выхода одного или нескольких сопел. В работе выполнены экспериментальные исследования турбинных одно-венечных ступеней малогабаритных турбин осевого типа (рабочим телом явился воздух). Результаты исследований парциальных малогабаритных осевых турбинных ступеней позволяют получить расчетные зависимости для оценки потерь кинетической энергии на вентиляцию газа рабочими лопатками. Представлены результаты сравнения потерь мощности от вентиляции рабочего колеса рассмотренной в статье конструкции в сравнении с данными других авторов.

**Ключевые слова:** эффективность, судовая энергетическая установка, малогабаритная турбина, сопловой аппарат, рабочее колесо, турбинная ступень.

## LOSSES OF KINETIC ENERGY IN FRICTION AND VENTILATION IN PARTIAL SMALL-SCALE TURBINE STEPS

**Yuriy V. Solomakhin**

the assistant professor, cand.Sci.Tech.,  
the assistant professor of department of transport processes and technologies  
Vladivostok State University Economics and Service  
Gogolya str. 41, Vladivostok, 690014, Russian Federation  
e-mail: [rector@vvsu.ru](mailto:rector@vvsu.ru)

**Lyudmila P. Tsigankova**

the assistant professor of department of ship power engineering and automation  
Far Eastern Federal University  
Suhanova str., 3, Vladivostok 690950, Russian Federation  
e-mail: [rector@vvsu.ru](mailto:rector@vvsu.ru)

**Andrey Y. Fershalov**

Cand.Sci.Tech., the assistant professor of department of transport processes and technologies  
Vladivostok State University Economics and Service  
Gogolya str. 41, Vladivostok, 690014, Russian Federation  
e-mail: [rector@vvsu.ru](mailto:rector@vvsu.ru)

### Abstract

The work is devoted to estimation of the magnitude of ventilation losses of kinetic energy of axial small-sized turbine stages used in ship main and auxiliary mechanisms. The article deals with the issues related to the ventilation of the working fluid (gas or steam) by the impeller blades in the region

between the impeller and the nozzle device caused by the presence of an inactive arc at the impeller due to the partial supply of the working fluid to the flowing part of the impeller, - additional losses of the kinetic energy of the flow when using nozzle devices with small (less than  $12^\circ$ ) exit angles of one or several nozzles. Experimental studies of turbine single-stage stages of small-sized turbines of axial type have been performed (air was the working fluid). The results of investigations of partial small-sized axial turbine stages allow obtaining the mathematical dependences for estimating the losses of kinetic energy for venting of gas by rotor blades. The results of comparing the power losses from the ventilation of the rotor with the structure examined in the article are compared with the data of other authors.

**Keywords:** efficiency, ship power plant, small-sized turbine, nozzle engine, rotor blades, turbine stage.

## Введение

Широкая область применения турбин в судовой энергетике не только в качестве главных двигателей, но и вспомогательных, поддерживает интерес исследователей к совершенствованию энергетической эффективности малогабаритных турбин, эксплуатируемых при ограниченных расходах рабочего тела. Турбины такого типа используют в качестве: главных двигателей на автономных аппаратах малого водоизмещения; приводных двигателей генераторов, насосов и компрессоров для наддува.

Одним из направлений конструирования турбин любого типа – это поэлементное совершенствование их проточной части на основе полученных, в результате исследований, закономерностей потерь кинетической энергии отдельно в сопловом аппарате и рабочем колесе, при их совместной работе в ступени. Эти исследования для сопловых аппаратов с углом выхода сопел  $12^\circ \dots 38^\circ$  успешно выполнены в ряде организаций: СПбПУ, МАИ, МЭИ, ЦКТИ, ЦИАМ и др.

В 1981 году профессором СПбПУ И.И. Кирилловым было предложено уменьшить угол выхода сопел менее  $9^\circ$  [1], что позволило, в ряде случаев, избежать парциального подвода газа к рабочему колесу. Исследования в этом направлении позволили разработать высокоэффективный сопловой аппарат [2]. Результаты последующих испытаний ступеней, имеющих в своем составе сопловой аппарат такой конструкции, показали перспективность работ в этом направлении [3-10]. Были отработаны методики – проектирования сопловых аппаратов при степени парциальности близкой к единице с предложенными соплами [11-15] и определения параметров газа в области между сопловым аппаратом и рабочим колесом [16-19] в таких ступенях.

Предпосылкой для выполнения данной работы стало то, что в ряде случаев, массовый расход газа настолько мал, что даже при углах выхода сопел  $5^\circ$  турбинную ступень необходимо выполнять в парциальном исполнении со степенью парциальности менее 0,5. В этом случае использование рекомендаций, изложенных в вышеупомянутых работах, может привести к несоответствию предполагаемых характеристик ступени к действительным, даже при использовании методики, приведенной в работе [20], разработанной для получения

возможности переноса результатов исследований эффективности ступени из-за наличия парциального подвода газа к проточной части рабочего колеса.

## 1. Постановка задач исследования

Для детального исследования потерь кинетической энергии на вентиляцию газа в парциальных малогабаритных осевых турбинных ступенях был проведен анализ факторов, влияющих на величину потерь и степень их влияния на процесс.

Присутствие парциального подвода рабочего тела к рабочему колесу предполагает наличие активной и неактивной дуги подвода. При пересечении кромками лопаток рабочего колеса этих зон происходит перемешивание застойного и основного потоков рабочего тела, что приводит к изменению параметров газа в области между сопловым аппаратом и рабочим колесом и, как следствие, к ряду дополнительных потерь кинетической энергии. Такие процессы приводят к увеличению угла натекания газа и уменьшению его скорости на входном участке кромки рабочей лопатки. На выходном участке кромки происходит уменьшение угла и снижение давления. Это приводит к нерасчетному обтеканию рабочих лопаток, что снижает энергетическую эффективность турбин.

Результаты предварительного анализа показали, что мощность, потребляемая на вентиляцию рабочего тела в неактивной области между сопловым аппаратом и рабочим колесом, определяется работой совершаемой рабочим колесом для вентиляционного движения единицы веса газа в области неактивной дуги. В свою очередь количество вентилируемого газа пропорционально объему области в районе неактивной дуги и окружной скорости. Необходимо учесть, что работа вентиляции единицы веса газа пропорциональна квадрату окружной скорости.

## 2. Экспериментальный стенд

Экспериментальные исследования проводились на моделях, разработанных и изготовленных в СПбПУ [21]. Выбор размеров экспериментальных моделей обусловлен размерами натурной турбинной ступени и имеющимися воздуховодными средствами лаборатории (рис. 1, 2). Объектом исследований стали турбинные одно венечные ступени



малогабаритных турбин осевого типа. Рабочим телом явился воздух.

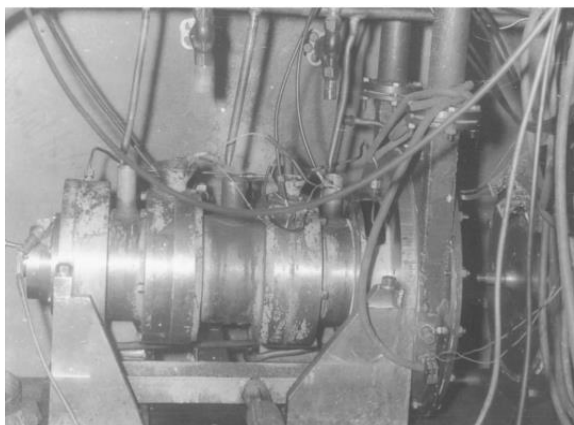


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки СПБПУ

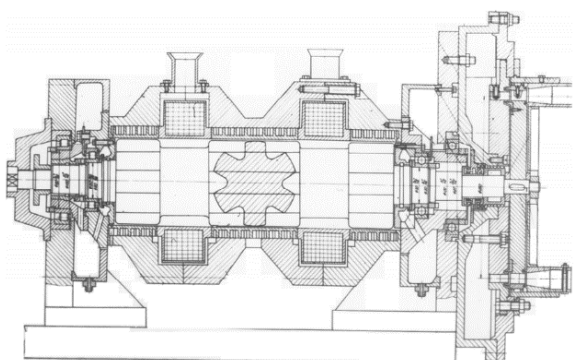


Рис. 2. Схема экспериментальной установки СПБПУ

### 3. Анализ результатов

На рис. 3 представлены сравнительные результаты потерь мощности на вентиляцию испытанных ступеней с зависимостями, рекомендуемыми различными организациями.

Видно, что большинство приведенных на рис. 3 зависимостей дают завышенные значения потерь мощности на вентиляцию газа кромками лопаток рабочего колеса. Это можно объяснить тем, что лопатки рабочих колес конструкции СПБПУ расположения с большим относительным шагом, что предопределяет меньшее, в сравнении с традиционными рабочими колесами, число лопаток. Следовательно, так же меньше и количество входных и выходных кромок лопаток, что приводит к снижению потерь мощности на вентиляцию.

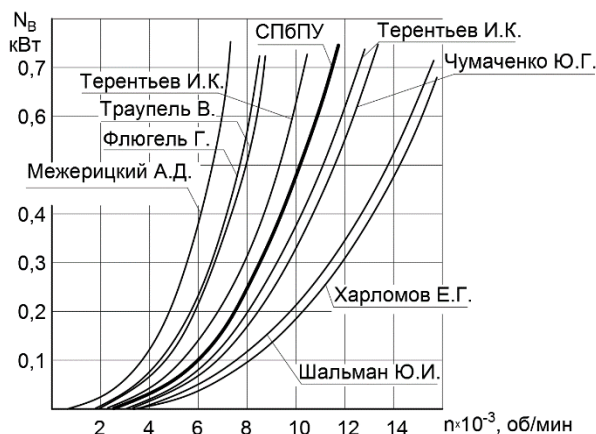


Рис. 3. Потери мощности от вентиляции рабочего колеса в сравнении с данными других авторов

К недостатку конструкции таких рабочих колес, с точки зрения потерь мощности на вентиляцию, можно отнести то, что кромки их лопаток имеют протяженные входные и выходные участки которые вентилируют пассивное рабочее тело, находящееся в неактивной зоне. Однако небольшое количество таких участков, зависящих от числа рабочих лопаток, и кроме того, снижение степени парциальности, а вместе с ней и величину зоны неактивной дуги не дает ощутимого увеличения потерь мощности на вентиляцию.

На рис. 4 представлены опытные зависимости исследования потерь на трение и вентиляцию рабочего колеса конструкции СПБПУ. Зависимости были получены путем прокручивания диска с наружным диаметром и толщиной равными рабочему колесу при тех же зазорах и условиях работы. Разность зависимостей дает потерю мощности на вентиляцию. Нижняя кривая представляет собой зависимость потери мощности воздушной турбины, с помощью которой производилось раскручивание объектов.

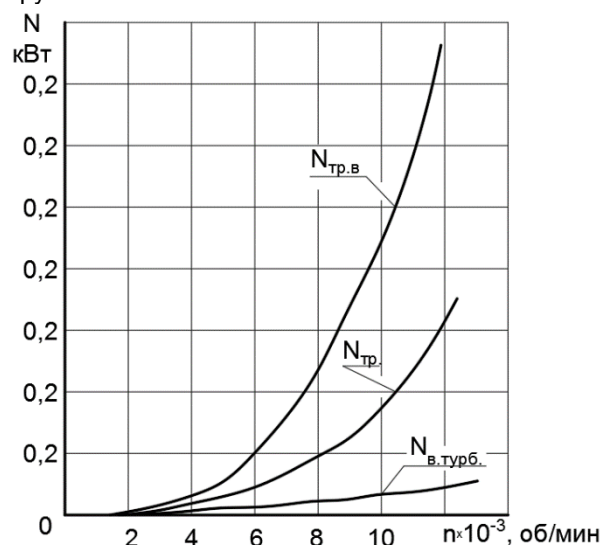


Рис. 4. Потери на трение и вентиляцию рабочего колеса конструкции СПБПУ

### Заключение

В результате проведенного исследования было выявлено:

- не учет различия значений газодинамических характеристик потока газа в области между рабочим колесом и сопловым аппаратом в полноподводных и парциальных турбинах, работающих при одинаковых значениях входных параметров газа и одинаковых характеристиках среды, куда происходит выхлоп рабочего тела, даже при одинаковых размерах проточной части приводит к смене режимов обтекания рабочих лопаток, что необходимо учитывать при проектировании;
- рассмотренный тип турбин с малыми выходными углами сопел сопловых аппаратов и

большими относительными шагами рабочих колес имеет рабочие лопатки с удлиненными входными и выходными кромками, что приводит к тому, что каждая лопатка вентилирует воздух с большей мощностью. Несмотря на это, увеличение потерь мощности турбины на вентиляцию газа не происходит благодаря меньшему числу лопаток и меньшей площади неактивной части рабочего колеса благодаря большому относительному шагу последнего и малым углам выхода сопел соплового аппарата, что делает косой срез более вытянутым в сравнении с соплами традиционных сопловых аппаратов.

### Литература

1. Кириллов, И.И. Патент на изобретение № 857512 (СССР). Осевая турбина / Ленинградский политехнический институт, 1981.
2. Фершалов Ю.Я., Рассохин В.А. Сопловой аппарат осевой турбины // патент на изобретение RUS 2232902 05.07.2002
3. Рассохин В.А., Раков Г.Л., Никитенко Е.Л., Фершалов Ю.Я., Смирнов К.А. Экспериментальный стенд для исследований малорасходных турбин при высоких степенях расширения // депонированная рукопись № 423-90 18.04.1990
4. Фершалов Ю.Я. Совершенствование сверхзвуковых осевых малорасходных турбин // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дальневосточный федеральный университет. Владивосток, 2000
5. Фершалов Ю.Я. Совершенствование сверхзвуковых осевых малорасходных турбин // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дальневосточный федеральный университет. Владивосток, 1999
6. Фершалов Ю.Я. Разработка моделей малорасходных турбинных ступеней и стенда для исследования сопловых аппаратов // Судостроение. 2004. № 6. С. 42-46.
7. Фершалов Ю.Я., Ханькович И.Н., Минаев А.Н., Карастелёв Б.Я., Якубовский Ю.В., Кончаков Е.И. Влияние режимных факторов на КПД малорасходных турбинных ступеней // Научное обозрение. 2012. № 5. С. 425-439.
8. Фершалов Ю.Я., Ханькович И.Н., Минаев А.Н., Карастелёв Б.Я., Якубовский Ю.В., Кончаков Е.И. Влияние конструктивных факторов на КПД малорасходных турбинных ступеней // Научное обозрение. 2012. № 5. С. 440-450.
9. Фершалов Ю.Я. Моделирование, анализ и совершенствование газодинамических характеристик судовых осевых сверхзвуковых малорасходных турбинных ступеней // автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Дальневосточный федеральный университет. Владивосток, 2015.
10. Фершалов Ю.Я. Моделирование, анализ и совершенствование газодинамических характеристик судовых осевых сверхзвуковых малорасходных турбинных ступеней // диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Дальневосточный федеральный университет. Владивосток, ДВФУ, 2015.
11. Фершалов Ю.Я., Алексеев Г.В. Влияние степени расширения сопел с малым углом выхода на эффективность малорасходных турбин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2013. № 8 (197). С. 18-22.
12. Фершалов Ю.Я., Чехранов С.В. Статические испытания сопловых аппаратов с малым углом выхода потока // Судостроение. 2005. № 5. С. 54-56.
13. Фершалов Ю.Я., Луценко В.Т. Определение степени расширения сопел с малым углом выхода для сопловых аппаратов малорасходных турбин // Судостроение. 2012. № 4. С. 50-51.
14. Фершалов Ю.Я. Степень расширения сопел с малым углом выхода, предназначенных для сопловых аппаратов осевых малорасходных турбин // Автомобильная промышленность. 2013. № 3. С. 16-19.
15. Fershalov Yu.Ya., Sazonov T.V. Experimental research of the nozzles // Advanced Materials Research. 2014. Т. 915-916. С. 345-348.
16. Алексеев Г.В., Фершалов М.Ю., Фершалов Ю.Я., Луценко В.Т. Влияние режимных факторов на степень реактивности малорасходных турбинных ступеней // Научное обозрение. 2012. № 2. С. 332-345.
17. Алексеев Г.В., Фершалов М.Ю., Фершалов Ю.Я., Луценко В.Т., Якубовский Ю.В., Карастелёв Б.Я., Кончаков Е.И. Влияние конструктивных факторов на степень реактивности малорасходных турбинных ступеней // Научное обозрение. 2012. № 2. С. 346-357.
18. Фершалов М.Ю., Фершалов Ю.Я., Алексеев Г.В. Степень реактивности малорасходной турбины с малыми конструктивными углами выхода сопел соплового аппарата // Научное обозрение. 2013. № 1. С. 149-153.

19. Алексеев Г.В., Фершалов М.Ю., Фершалов Ю.Я., Луценко В.Т. Обоснование и выбор метода исследования степени реактивности малорасходных турбин // Научное обозрение. 2012. № 2. С. 322-331.
20. Фершалов Ю.Я. Методика физического моделирования газодинамических процессов в проточной части турбомашин // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2012. № 4. С. 71-74.
21. Соломахин Ю.В., Бенько А.В. Экспериментальные исследования малорасходных турбин с малым углом выхода потока на номинальном и переменном режимах работы // Научное обозрение. 2015. № 7. С. 200-208.

#### References

1. Kirillov, I.I. Patent na izobreneniye № 857512 (SSSR). *Osevaya turbine. Leningradskiy politekhnicheskiy institut, 1981.*
2. Fershalov YU.YA., Rassokhin V.A. Soplovyoy apparat osevoy turbiny // patent na izobrenenie RUS 2232902 05.07.2002
3. Rassokhin V.A., Rakov G.L., Nikitenko E.L., Fershalov YU.YA., Smirnov K.A. Eksperimental'nyy stend dlya issledovaniy maloraskhodnykh turbin pri vysokikh stepenyakh rasshireniya // deponirovannaya rukopis' № 423-90 18.04.1990
4. Fershalov YU.YA. Sovershenstvovanie sverkhzvukovykh osevykh maloraskhodnykh turbin // dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet. Vladivostok, 2000
5. Fershalov YU.YA. Sovershenstvovanie sverkhzvukovykh osevykh maloraskhodnykh turbin // avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet. Vladivostok, 1999
6. Fershalov YU.YA. Razrabotka modeley maloraskhodnykh turbinnykh stupeney i stenda dlya issledovaniya soplovykh apparatov // Sudostroenie. 2004. № 6. S. 42-46.
7. Fershalov YU.YA., Han'kovich I.N., Minaev A.N., Karasteliyov B.YA., YAkubovskiy YU.V., Konchakov E.I. Vliyaniye rezhimnykh faktorov na KPD maloraskhodnykh turbinnykh stupeney // Nauchnoye obozreniye. 2012. № 5. S. 425-439.
8. Fershalov YU.YA., Han'kovich I.N., Minaev A.N., Karasteliyov B.YA., YAkubovskiy YU.V., Konchakov E.I. Vliyaniye konstruktivnykh faktorov na KPD maloraskhodnykh turbinnykh stupeney // Nauchnoye obozreniye. 2012. № 5. S. 440-450.
9. Fershalov YU.YA. Modelirovaniye, analiz i sovershenstvovanie gazodinamicheskikh kharakteristik sudo-vykh osevykh sverkhzvukovykh maloraskhodnykh turbinnykh stupeney // avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet. Vladivostok, 2015
10. Fershalov YU.YA. Modelirovaniye, analiz i sovershenstvovanie gazodinamicheskikh kharakteristik sudovykh osevykh sverkhzvukovykh maloraskhodnykh turbinnykh stupeney // dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk / Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet. Vladivostok, DVFU, 2015
11. Fershalov YU.YA., Alekseev G.V. Vliyaniye stepeni rasshireniya sopol s malym uglom vykhoda na effektivnost' maloraskhodnykh turbin // Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniyem. 2013. № 8 (197). S. 18-22.
12. Fershalov YU.YA., Chekhranov S.V. Sticheskie ispytaniya soplovykh apparatov s malym uglom vykhoda potoka // Sudostroenie. 2005. № 5. S. 54-56.
13. Fershalov YU.YA., Lutsenko V.T. Opredeleniye stepeni rasshireniya sopol s malym uglom vykhoda dlya soplovykh apparatov maloraskhodnykh turbin // Sudostroenie. 2012. № 4. S. 50-51.
14. Fershalov YU.YA. Stepen' rasshireniya sopol s malym uglom vykhoda, prednaznachennykh dlja soplovykh apparatov osevykh maloraskhodnykh turbin. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2013. № 3. S. 16-19
15. Fershalov Yu.Ya., Sazonov T.V. Experimental research of the nozzles // *Advanced Materials Research*. 2014. T. 915-916. S. 345-348.
16. Alekseev G.V., Fershalov M.YU., Fershalov YU.YA., Lutsenko V.T. Vliyaniye rezhimnykh faktorov na stepen' reaktivnosti maloraskhodnykh turbinnykh stupeney // Nauchnoye obozreniye. 2012. № 2. S. 332-345.
17. Alekseev G.V., Fershalov M.YU., Fershalov YU.YA., Lutsenko V.T., YAkubovskiy YU.V., Karasteliyov B.YA., Konchakov E.I. Vliyaniye konstruktivnykh faktorov na stepen' reaktivnosti maloraskhodnykh turbinnykh stupeney // Nauchnoye obozreniye. 2012. № 2. S. 346-357.
18. Fershalov M.YU., Fershalov YU.YA., Alekseev G.V. Stepen' reaktivnosti maloraskhodnoy turbiny s malymi konstruktivnymi uglami vykhoda sopol soplovygo apparata // Nauchnoye obozreniye. 2013. № 1. S. 149-153.
19. Alekseev G.V., Fershalov M.YU., Fershalov YU.YA., Lutsenko V.T. Obosnovaniye i vybor metoda issledovaniya stepeni reaktivnosti maloraskhodnykh turbin // Nauchnoye obozreniye. 2012. № 2. S. 322-331.
20. Fershalov YU.YA. Metodika fizicheskogo modelirovaniya gazodinamicheskikh protsessov v protochnoy chasti turbomashin // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika*. 2012. № 4. S. 71-74.
21. Solomakhin YU.V., Ben'ko A.V. Eksperimental'nye issledovaniya maloraskhodnykh turbin s malym uglom vykhoda potoka na nominal'nom i peremennom rezhimakh raboty // Nauchnoye obozreniye. 2015. № 7. S. 200-208.

УДК 629.5.06

## О ВЛИЯНИИ ЁМКОСТИ ПРОВОДНИКОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ТОКИ ПОТЕРЬ В КОРАБЕЛЬНЫХ ГЕРМОВВОДАХ

**Михаил Васильевич Тепляков**

кандидат технических наук

заместитель генерального директора по научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе

ООО «Научно-производственный центр «Судовые электротехнические системы»

196128, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6

e-mail: [temiva1948@yandex.ru](mailto:temiva1948@yandex.ru)**Мargarita Дамировна Лошенко**

Аспирант

инженер-технолог 2 категории

ООО «Научно-производственный центр «Судовые электротехнические системы»

196128, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6

e-mail: [margarita5250@yandex.ru](mailto:margarita5250@yandex.ru)

### Аннотация

В статье рассматриваются параметры токопроводящих проводников и их систем, являющихся неотъемлемой частью устройств ввода кабелей в корпуса электрооборудования – корабельных гермовводов, к данным параметрам относятся: характеристики изоляционных материалов и емкости проводников. Предварительные расчеты и измерения емкостей проводных линий отвечают за стабильность процесса изготовления и состояния изделий, а также позволяют производить на практике возможную оценку утечки сигнала и оценку токов утечки в сравнении с уровнями сигналов в контрольных и управляющих цепях. Так же в данной статье рассмотрена методика расчета рабочих емкостей проводников гермовводов применительно к идеализированной конструкции гермоввода, предложена методика расчета емкостей пары проводников гермоввода в экране, представлены некоторые результаты исследования корабельного гермоввода с девятью проводниками при изучении токов утечки на корпус и при различном расположении проводников с прямой и обратной цепями.

**Ключевые слова:** емкости проводников, изоляционные материалы, токи потерь, корабельный гермоввод, токоведущая жила, диэлектрическая проницаемость, экранирование, судовой кабель.

## ABOUT INFLUENCE OF CAPACITY OF CONDUCTORS AND CHARACTERISTICS OF INSULATING MATERIALS ON CURRENTS OF LOSSES IN THE SHIPS CABLE ENTRY SEALS

**Michael V. Teplyakov**

candidate of engineering sciences

deputy director general for research and developmental works

Limited liability company "Scientific-production center of

"Ship's electrical power system"

Blagodatnaya st., 6, St. Petersburg 196128, Russian Federation

e-mail: [temiva1948@yandex.ru](mailto:temiva1948@yandex.ru)**Margarita D. Loshenko**

fellow

engineer 2 categories

Limited liability company "Scientific-production center

of "Ship's electrical power system"

Blagodatnaya st., 6, St. Petersburg 196128, Russian Federation

e-mail: [margarita5250@yandex.ru](mailto:margarita5250@yandex.ru)

### Abstract

In article is concerned parameters of the conducting conductors and their systems which are an integral part of the input equipment of cables in electric equipment cases – ships cable entry seals, belong to these parameters: characteristics of insulating materials and capacity of conductors. Predesigins and measurements of capacities of wire lines are responsible for stability of process of

production and a condition of products, and also allow to make a possible assessment of leakage of a signal in practice and assessment of currents of leak in comparison with levels of signals in the control and operating chains. Also in this article is concerned methods of calculation of working capacities of conductors of cable entry seals, is offered the method of calculation of capacities of couple of conductors of a entry seal in the shield, are presented some results of a research of a ships cable entry seals with ninety eight conductors when studying currents of leak on the case are presented and at various arrangement of conductors with direct and return chains.

**Key words:** capacity of conductors, insulating materials, currents of losses, ships cable entry seals, current carrying conductor, dielectric permittivity, shielding, ship cable.

Электрические емкости, емкостные связи, асимметрия значений других электрических параметров токопроводящих проводников и их систем относятся к основным из числа нормируемых величин для электрических линий. Расчеты и измерения этих параметров рекомендуется проводить, если данное требование задаётся, при разработке изделий и элементов, входящих в кабельную линию и выполняющих в качестве основной ту же функцию, что и кабель, с целью оценок соответствия изделия или линии техническим требованиям, стабильности технологического процесса и состояния изделия, например гермоввода, при хранении, монтаже и эксплуатации. Промежутки между токопроводящими элементами в гермовводе, особенно в зоне присоединения гермовставки к токоведущим жилам гермоввода, заполнены различными изолирующими материалами, что формирует неоднородность в кабельной линии. Поскольку значения диэлектрических проницаемостей  $\epsilon$  изоляционных материалов разные, то их отличия могут влиять на параметры емкости и эти особенности должны учитываться в расчетах. В целях упрощения расчета в инженерных формулах вводят эквивалентное значение  $\epsilon = \epsilon_{экв}$ , относящееся ко всей изоляции. Так хорошо известна приближенная формула,

$$C = \frac{\epsilon_{экв}}{36 \ln\left(\frac{2a}{d} \psi\right)} \quad (1)$$

в ней кроме  $\epsilon_{экв}$  введен коэффициент  $\psi$ , учитывающий роль других жил кабеля, окружающих расчетную пару – прямой и обратный провод, т.е. имеет место дополнение к собственной ёмкости ещё и частичных ёмкостей, за счёт присутствия в окружении расчётной пары соседних токопроводящих элементов (жил, экранов, корпусных деталей). Проведём оценку возможной погрешности в случае применения приведённой формулы к расчётам основных параметров гермоввода, как элемента кабельной линии. В рамках принятой идеализации (1) можно задать, как точные,  $d$  – диаметр токопроводящих жил (приведённый к монолитной жиле) и  $a$  – расстояние между центрами жил пары. Величины  $\epsilon_{экв}$ ,  $\psi$  – вводят как приближенные. Значение  $\epsilon_{экв}$  вычисляют отдельно от конструкции рассматриваемого электрооборудования, усредняя значения  $\epsilon$  всех сред изоляции.

Рассмотрим влияние величин, представленных в правой части выражения (1) на значения ёмкости  $C$ . При первом рассмотрении

формулы становится очевидным, что значение дроби  $\frac{2a}{d}$  применительно к гермовводу

отличается от аналогичного значения групп проводников, располагаемых по одну и другую сторону от герметичной вставки. Это вызвано хаотичным расположением проводов в сравнении с геометрией расположения проводников герметичной вставки, где все расстояния заданы конструкцией пресс-форм и не могут меняться при изменении положения гермоввода в пространстве. Однако участок геометрически строгого в части расстояний расположения проводников (во вставке) меньше общей длины конструкции гермоввода в 30-40 раз. Поэтому в расчётах величин межпроводниковой ёмкости этот фактор можно не учитывать. Также можно не учитывать и различия в диэлектрической проницаемости диэлектриков, находящихся в конструкции гермовставки, тем более что эти диэлектрики имеют один и тот же порядок значений  $\epsilon$  и отличаются не более чем в 3,3 раза, см. таблицу 1.

Таблица 1

№№ п/п	Наименование диэлектрика	Значение $\epsilon$
1	Прессматериал ДСВ – 2л	$\leq 7$
2	Электроизоляционный полиэтилен по ГОСТ 16336–77	2,25
3	Эпоксидный компаунд на основе смолы ЭД-20	4
4	Термоусаживаемая трубка марки ТТК на основе полиэтилена	$\leq 3,5$
5	Кремнийорганическая резина марки К- 69 и её аналоги	$\leq 3,5$
6	Электроизоляционное вакуумное стекло марки С52-1	7 – 7,5

Вместе с тем следует учесть, что длины участков линий, на которых тот или иной диэлектрик участвует в формировании ёмкости линии в 3-4 раза меньше линейного размера герметичной вставки. Участок, на котором проводники размещены в прессматериале либо в электровакуумном стекле не превышает 27 мм, что более чем в 80 раз меньше общей длины гермоввода. Основной размер гермоввода определяется длиной проводов ПВКВ и отрезков токоведущих жил кабеля СМПВГ, которая

составляет около 95 % от общего линейного размера гермоввода. Таким образом влияние изменения диэлектрика, использованного в конструкции гермоввода, по его длине можно не учитывать, а брать за основу параметр  $\epsilon$  для резины К- 69 и изоляционного стабилизированного полиэтилена – изоляции проводов.

Для расчета рабочих емкостей симметричных кабелей с комбинированной изоляцией, содержащих одну пару, четверку или пять четверок, имеются формулы [1]. В корабельных забортных системах применяются простые симметричные структуры, содержащие одну пару. По определению к симметричным кабелям относятся кабели, у которых обе жилы физической цепи (пары) являются однотипными, т.е. изготовлены из одинакового материала, имеют одинаковый диаметр, тип изоляции. В них для изоляции жил и для среды заполнения между жилами введены разные значения  $\epsilon$ , поэтому они точнее отражают конструкцию изоляции, но формулы остаются частными, как предназначенные только для рабочих емкостей симметричных цепей кабелей и ограничены введенной идеальной симметрией жил. Они исключают учет поясной изоляции (*поясная изоляция - дополнительная изоляция пары жил от экрана*), как отдельного элемента конструкции. Идеализация размеров и расположения жил упрощает расчет, но исключает все причины образования емкостной асимметрии и их оценки. Погрешность расчета рабочей емкости по [1] имеет порядок 6 %.

Современные компьютерные программы открыли принципиально новые возможности проведения расчетов кабелей и позволяют вместо инженерных формул применять общие методы, полные и точные, которые получены на основе единой постановки задачи и с возможностью отражать большинство реальных особенностей структуры и конструкции кабеля, свойств всех материалов его изоляции. В постановке [2] предложен метод расчета емкостей рабочих и других цепей кабеля с вычислением матриц потенциальных коэффициентов и частичных емкостей на основе модели обобщенного кабеля. Частичные емкости связаны с емкостными коэффициентами кабеля уравнениями  $C_{i,k} = -\beta_{i,k} > 0$  – частичная взаимная емкость  $i$ -й и  $k$ -й жил,  $C_{k,0} > 0$  – частичная емкость  $k$ -й жилы по отношению к экрану,  $C_{k,k} = C_{k,0} + C_{k,2} + \dots + C_{k,0} + \dots + C_{k,m} = \beta_{k,k} > 0$  – емкость  $k$ -й жилы по отношению к экрану и остальным жилам, соединенным с экраном и землей. Матрица коэффициентов ( $\beta_{i,k}$ ) является обратной матрице потенциальных коэффициентов  $\alpha_{i,k}$ , то есть  $(\beta_{i,k}) = (\alpha_{i,k})^{-1}$ , которые непосредственно зависят от параметров конструкции кабеля. Зависимости  $\alpha_{i,k}$  от конструкции следуют из решения краевой элект-

ростатической задачи. Для этого её решение приводят к форме

$$(U_k) = (\alpha_{k,i}) \times (q_i) \quad (2),$$

где  $(U_k)$  – вектор (матрица-колонка) напряжений (потенциалов жил) простых цепей),  $(\alpha_{k,i})$  – вектор (матрица-колонка) потенциальных коэффициентов,  $(q_i)$  – вектор (матрица-колонка) зарядов простых цепей (жил кабеля).

Пространственная функция электрического потенциала в любой точке любого слоя изоляции или заполнения кабеля представляется в форме разложения ее в комплексный ряд Фурье по экспонентам  $e^{in\varphi}$  при  $n = (\infty \geq v \geq 1)$  [2],

$$U_{(\rho,\varphi)} = C_0 + D_0 \times I_{pp} + \frac{1}{2} \sum_{v=1}^{\infty} [C_v \times \chi^{-1} + \overline{D_v} \times \chi^{-v}] \times e^{in\varphi} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\infty} [\overline{C_v} \times (v) + D_v \times \chi^{-v}] \times e^{-in\varphi} \quad (3),$$

где  $C_0, D_0, C_v, D_v$  – постоянные интегрирования;  $\rho, \varphi$  – полярные координаты рассматриваемой точки изоляции в поперечном сечении кабеля,  $r$  – внутренний радиус слоя изоляции жилы, если  $\rho \geq r$ , или внешний радиус

слоя поясной изоляции, если  $\rho \leq r, \chi = \frac{\rho}{r}$ .

Напряженности электрического поля в условной точке  $\rho, \varphi$  вычисляются как составляющие градиента  $U(\rho,\varphi)$  по формулам[1]:

$$E_\rho = \frac{\partial U(\rho,\varphi)}{\partial \rho}, E_\varphi = -\frac{\partial U(\rho,\varphi)}{\rho \partial \varphi} \quad (4).$$

В любом из слоёв изоляции  $k$ - той жилы для одного из значений  $v$ :

$$E_{\rho vk} = -\frac{v}{\rho} (C_{vk} \times \chi_k^v - \overline{D_{vk}} \times \chi_k^{-v}) \times e^{in\varphi k}, \quad (5)$$

$$E_{\varphi vk} = -\frac{iv}{\rho} (C_{v0} \times \chi_k^{-v} + \overline{D_{vk}} \times \chi_k^{-v}) \times e^{in\varphi k}.$$

Заряды рассматриваются как источники электрического поля, при этом  $D_{0,k}$  для любого слоя изоляции  $k$ -й жилы и заряд  $q_k$ , связаны уравнением:

$$D_{0k} = -\frac{q_k}{2\pi\epsilon} \quad (6)$$

Однако расчёт ёмкостей проводников по отношению к корпусным деталям и пар проводников с использованием приведённых формул даже с использованием современной вычислительной техники даёт значения параметров, применительно к идеализированной конструкции гермоввода, которые могут существенно отличаться от численных значений параметров практического гермоввода, т.к. учёт



конструктивных особенностей гермовводов, возникающих при их монтаже, невозможен. Это объясняется тем, что токопроводящие цепи гермовводов при их изготовлении в пространстве формируются случайным образом, количество цепей различно, геометрические размеры прочной части гермоввода имеют отличия, как по диаметру, так и по длине. Существуют и другие обстоятельства, связанные с допусками на изоляцию, размеры металлических деталей и др., которые влияют на точность расчётов. Поэтому и в этом случае данные расчётов могут иметь различия в сравнении с результатами замеров общепринятыми измерительными средствами.

На практике значения ёмкостей проводных линий интересны с точки зрения изучения возможной утечки сигнала, оценки токов утечки в сравнении с уровнями сигналов в контрольных и управляющих цепях. При этом в конкретных системах применяются конструкции гермовводов, для которых нормированы такие важные показатели как величина сопротивления изоляции, прочность изоляции, а значения ёмкости цепей отсутствуют, хотя уровни передаваемых сигналов по напряжению, величине тока и частоте также заданы. Рассмотрим ещё один вариант расчёта ёмкостей проводников гермоввода.

Схема для расчёта ёмкостей пары проводников в экране приведена на рис. 1.

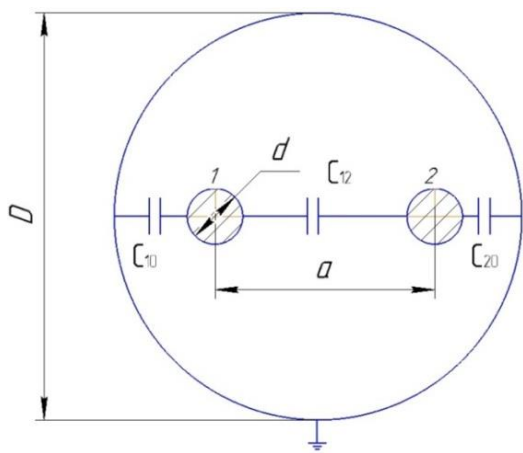


Рис. 1 Схема ёмкостей для пары проводников гермоввода, помещённой в экран, где:  $d$  – диаметр проводника;  $D$  – условный диаметр пары жил в экране;  $a$  – расстояние между центрами токоведущих жил;  $C_{10}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{20}$  – собственная и частичные ёмкости; 1 и 2 обозначения проводников.

Ёмкость проводника в системе двух проводников, помещённых в общую металлическую оболочку или экран, вычисляется по формуле:

$$C = \frac{\epsilon}{4 \ln \frac{2a}{d} \times \frac{D^2 - a^2}{D^2 + a^2}} \times l = \frac{1,2\epsilon \times 10^{-6}}{\lg \frac{2a}{d} \times \frac{D^2 - a^2}{D^2 + a^2}} \times l, \quad (7)$$

Если оба проводника находятся под одним и тем же потенциалом, то

$$C = \frac{1,2\epsilon \times 10^{-6}}{\lg \frac{D^2 - a^2}{D^2 + a^2}} \times l. \quad (8)$$

Ёмкость пары проводников в общей металлической оболочке или экране может быть определена из частичных ёмкостей

(см. рис. 2) по формуле:

$$C = \frac{2(C_1 + C_2) - C_{12}}{4}, \quad (9)$$

где  $C_1$  – ёмкость между проводником А и проводником В, соединённым с экраном;  $C_2$  – ёмкость проводников А и В, соединённых вместе по отношению к экрану;  $l$  – длина пары проводников.

Ёмкость неэкранированной пары проводников:

$$C = \frac{\epsilon}{36 \ln \frac{2a - d}{d}}, \text{ мкФ/км.} \quad (10)$$

При подаче или снятии напряжения постоянного тока или вообще при изменениях величины приложенного напряжения наряду с током проводимости, который зависит от сопротивления изоляции, измеряемом мегаомметром, возникает ёмкостный ток. Характерная зависимость величины постоянного тока  $i$  от времени  $t$  при создании разности потенциалов между электродами ёмкости (конденсатора, проводниковой линии) приведена на рис. 2.

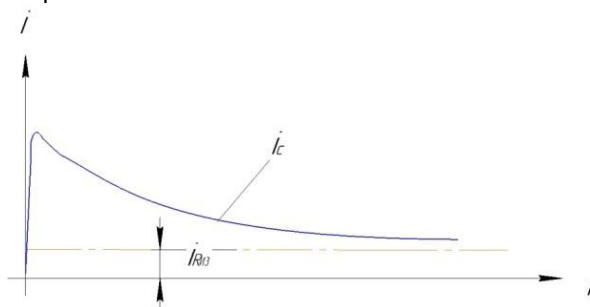


Рис. 2. Зависимость тока проводимости и ёмкостного тока от времени при подаче в линию напряжения постоянного тока, где  $i_c$  – ёмкостной ток утечки,  $i_{Rus}$  – ток утечки, определяемый сопротивлением изоляции.

Длительно ёмкостный ток существует только в изоляции, находящейся при изменении величины напряжения, т.е. при переменном токе. Ток проводимости существует все время, пока к изоляции приложено напряжение постоянного тока. При переменном токе ток проводимости меняется по величине и направлению в соответствии с изменением напряжения во времени. Ёмкостной ток также изменяется, но его величина может быть различной при разных частотах при одинаковом уровне напряжения. Это вызвано нелинейным характером протекания

заряда проводной линии, как ёмкости, и временным интервалом, в течение которого к ёмкости приложено напряжение прямой или обратной полярности.

Известно, что из четырёх характерных для электроизоляционных материалов (диэлектриков) параметров – L, C, R и G только C не зависит от частоты тока в линии.

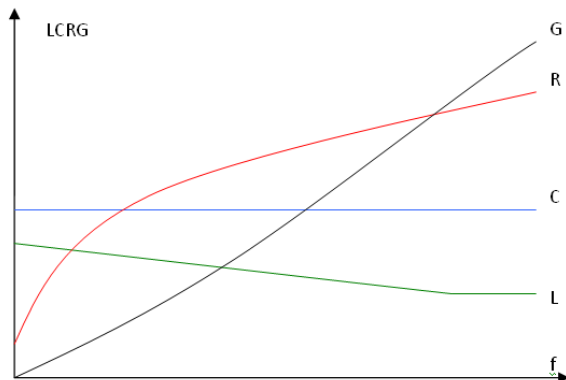


Рис.3. Зависимость электрического сопротивления R, индуктивности L, ёмкости C и проводимости G в диэлектрике от частоты тока.

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  нейтральных изоляционных материалов не зависит от частоты и слабо зависит от температуры, уменьшаясь при снижении последней вследствие теплового расширения вещества. У дипольных изоляционных материалов при повышении частоты переменного напряжения величина  $\epsilon$  сначала также остается неизменной, но начиная с некоторой критической частоты, когда поляризация уже не успевает полностью завершиться за один полупериод,  $\epsilon$  начинает уменьшаться, приближаясь при весьма высоких частотах к значениям, характерным для нейтральных изоляционных материалов. В области низких температур, когда вещество обладает большой вязкостью, ориентация дипольных молекул вдоль поля затруднена; при

повышении температуры и уменьшении вязкости возможность ориентации диполей облегчается, вследствие чего  $\epsilon$  возрастает. При сравнительно высоких температурах вследствие усиления тепловых колебаний молекул степень ориентации молекул снижается, что приводит к уменьшению  $\epsilon$ . Таким образом, следует обратить внимание на то, что  $\epsilon$  следует рассматривать как неизменяющую от частоты величину при одинаковых температурных условиях.

Достаточные для возможных расчётов утечек токов за счёт ёмкости в проводных линиях данные могут быть получены с помощью замера токов утечки в отдельных проводниковых парах. Так, например, при исследовании гермоввода с 98 проводниками при изучении токов утечки на корпус были получены следующие данные, которые представлены в таблице 2.

Разброс значений для токов утечки в данном случае объясняется различием ёмкостей различных проводников по отношению к корпусным деталям гермоввода и ошибками измерений. С целью частичного устранения этого минимальные и максимальные значения измерений при расчёте средних отброшены. Однако на практике следует дополнительно учитывать наличие металлического корпуса судна и близость расположения к нему пучков проводов. Вместе с этим, так как провода по отношению к корпусу судна находятся на расстоянии в несколько десятков раз большем, нежели проводники в гермовводе по отношению к его корпусу, то указанные в таблице значения могут считаться вполне реальными с некоторыми отклонениями.

Наличие ёмкостей между проводниками в гермовводе также способствует появлению наведённых напряжений и токов в рабочих цепях. Выполненные измерения на гермовводах при различном расположении проводников с прямой и обратной цепями дали следующие результаты, данные которых приведены в таблице 3.

Таблица 2

Действующее напряжение, В	Среднее значение тока утечки, мкА		Минимальное и максимальное значение тока утечки	
	частота сигнала 400 Гц, мкА	частота сигнала 5000 Гц, мкА	частота сигнала 400 Гц, мкА	частота сигнала 5000 Гц, мкА
500	117,2182	1623,135	93,93/196,6	1404/2679

Таблица 3

Вариант №№	Описание контура	Величина тока в контуре		Величина наведённого в исследуемой цепи напряжения, мВ		Величина наведённого в исследуемой цепи тока, мкА	
		5В, 5 кГц	700В, 3,5 кГц	5В, 5 кГц	700В, 3,5 кГц	5В, 5 кГц	700В, 3,5 кГц
1	Под напряжением с заданным током находится один проводник без образования контура внутри гермоввода	160 мА	543 мкА	7,73	0,83	121,3	14,6
2	Проводники замкнутой цепи расположены на максимальном (в поперечном сечении) друг от друга расстоянии	160 мА	458 мкА	1,53	2,42	31	26,6
3	Проводники замкнутой цепи расположены на минимальном (в поперечном сечении) друг от друга расстоянии	160 мА	490 мкА	0,4	2,08	4,8	22,0

Из данных таблицы 3 видно, что величина наведённых токов для разомкнутой цепи в процентном отношении составляет для первого варианта при частоте основного сигнала 400 Гц – 0,076 %; для сигнала частотой 5кГц – 2,69 %. Для замкнутой цепи по варианту 2 при частоте основного сигнала 400 Гц – 0,019 %; для сигнала частотой 5кГц – 5,807 %. Для замкнутой цепи по варианту 3 при частоте основного сигнала 400 Гц – 0,003 %; для сигнала частотой 5кГц – 4,49 %.

Полученные экспериментальные данные не превышают расчётных значений погрешности (6%). Для того чтобы сделать выводы о достаточности выполненных исследований их следует сравнить с требованиями нормативной документации по качеству: допустимые отклонения напряжения и тока в цепях управления. Требованиями [3] возможные отклонения основных параметров промышленной электроэнергии определены.

Требования по отклонениям и потерям сигналов для специальных систем задаются разработчиками систем и аппаратуры и могут различаться в зависимости от назначения систем и эти требования уточняются на этапе разработки систем, стендовых испытаний, в которых гермовводы как элементы корабельной кабельной сети не участвуют. И по этой причине с возможными проявлениями воздействия конструкций гермовводов на работу систем специалисты сталкиваются только на этапе проведения испытаний систем на корабле.

Полученные экспериментальные данные значений ёмкостей проводников в гермовводах по сравнению с ёмкостями токоведущих жил отрезка кабеля СМПВГ такой же длины имеют пониженные в 1,8 – 2,7 раза показатели. Так,

например, если ёмкость пары жил в кабеле составляет около 200 пФ до 300, то ёмкость пары жил в гермовводе колеблется в пределах 110 пФ. Ёмкость пары проводников из провода ПВКВ составляет всего 80 пФ, т.е. на герметичную вставку приходится всего около 30 пФ. Вместе с тем использование кабеля с экранированными токоведущими жилами даёт существенный эффект по снижению наводимых на соседние проводники напряжений и токов при передаче сигналов повышенных частот.

### Заключение

1. Ёмкости проводников гермоввода вносят дополнения в общие ёмкости кабельных линий, что может отражаться на уровне потерь полезного сигнала, аналогично ранее описанным в [4] характеристикам, но при длине кабельных линий в десятки метров это влияние несущественно;

2. С целью снижения потерь следует рекомендовать в гермовводах применение экранирования для отдельных помехочувствительных цепей;

3. Для оценки работоспособности систем с чувствительными к помехам элементами при проведении приёмо-сдаточных испытаний на стендах включать в состав кабельных линий соответствующие по числу токоведущих элементов гермовводы;

4. Для оценки влияния ёмкостей токоведущих жил гермоввода необходимо сравнивать характеристики гермовводов с аналогичными параметрами соответствующих по длине судовыми кабелями, которые являются основой кабельных линий.

---

**Литература**

1. Мирзабекян Ж.М. Определение емкости симметричных кабелей связи. Электросвязь. №1, 1982.
2. Абрамов К.К. Модель конструкции обобщенного кабеля. Кабели и провода. № 2,2008.
3. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. ИПК.Издательство стандартов, 1998.
4. Michael V. Teplyakov, Margarita D. Loshenko. International Journal of Pure and Applied Mathematics. «ON CALCULATION OF PARAMETERS OF ELECTRIC CIRCUITS OF SHIP PRESSURE-SEAL FEED-THROUGHS». Volume 114 No. 2, 2017, pp. 343-351.

**References**

1. Mirzabekjan Zh.M. Opredelenie emkosti simmetrichnyh kabelej svjazi . Jelektrosvjaz'. №1,1982.
2. Abramov K.K. Model' konstrukcii obobshhennogo kabelja . Kabeli i provoda. №2, 2008.
3. GOST 13109-97. Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimosť tehlicheskih sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskoi jenergii v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija. IPK.-Izdatel'stvo standartov, 1998.
4. Michael V. Teplyakov, Margarita D. Loshenko. International Journal of Pure and Applied Mathematics. «ON CALCULATION OF PARAMETERS OF ELECTRIC CIRCUITS OF SHIP PRESSURE-SEAL FEED-THROUGHS». Volume 114 No. 2, 2017, pp. 343-351.

УДК 629.5.026:621.431.74

## ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ГЛАВНОГО СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Алена Александровна Темникова**

старший преподаватель кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники  
Астраханский государственный технический университет  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16  
e-mail: awe\_12@mail.ru

**Анатолий Рашидович Рубан**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники  
Астраханский государственный технический университет  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16  
e-mail: a.ruban1974@mail.ru

### Аннотация

В работе предлагается метод выбора главного судового двигателя. Существующие методики преимущественно опираются на выбор лишь одной оптимизирующей функции, либо, в случае многокритериального подхода, являются трудоемким процессом.

Приведенный метод рассматривается на примере ледокола, эксплуатирующегося в Северном Каспии и Волго-Каспийском канале. И включает в себя: предварительный анализ, критериальный и комплексный анализы. Использование критериального анализа допустимо при выборе одной оптимизирующей функции. Но такой подход исключает оптимизацию по другим характеристикам, и целесообразней применять комплексный анализ, основанный на методе принятых решений в условиях неопределенности по критерию Лапласа.

Таким образом, представленный алгоритм принятия решений позволяет учесть влияние всех заданных критериев (параметров двигателя, как количественных, так и качественных) и при этом не является трудоемким, что позволяет применять метод на практике (в конструкторских бюро).

**Ключевые слова:** выбор главного судового двигателя, критерии оптимизации, метод принятия решений, ледокол.

## OPTIMIZATION OF SELECTION OF MAIN SHIP ENGINE

**Alena A. Temnikova**

Senior Lecturer of Department of Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering  
Astrakhan state technical university  
Tatishcheva St., 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation  
E-mail: astu@astu.org

**Anatoly R. Ruban**

Candidate of technical sciences, associate professor  
Associate professor of Department of Shipbuilding and Power Complexes of Marine Engineering  
Astrakhan state technical university  
Tatishcheva St., 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation  
E-mail: a.ruban1974@mail.ru

### Abstract

The method of selecting the main ship engine is proposed in this paper. Existing methods predominantly rely on the choice of only one optimizing function or are a time-consuming process in the case of a multicriteria approach.

The above method is considered using the example of an icebreaker operating in the Northern Caspian and the Volga-Caspian Canal. And it includes preliminary analysis, criteria and complex analyzes.

It is acceptable to use criteria analysis when choosing one optimizing function. But this approach excludes the optimization for other characteristics, and it is more expedient to apply a complex analysis based on the decision-making method under the conditions of uncertainty based on the Laplace criterion.

Thus, the presented algorithm of decision making allows to take into account the influence of all the specified criteria (engine parameters, both quantitative and qualitative) and thus is not labor-consuming, which allows to apply the method in practice (in design bureaus).

**Keywords:** selection of the main ship engine, optimization criteria, method of decision making, icebreaker

## Введение

Выбор главного двигателя судового энергетического комплекса довольно обширная тема для изучения, вклад в которую внесли Г.А. Артемов [1], П.А. Гордеев, Г.В. Яковлев [2], Б.Л. Троицкий [3] и др. Существуют различные критерии выбора главного судового двигателя, а также способы оптимизации этого выбора: по прототипу, по предпочтительному критерию или оптимизирующей функции, многокритериальный подход и т.д.

Основы методики выбора двигателей впервые были опубликованы фирмой MAN B&M в 1986 г., которые опирались на использование типоразмерного ряда ДВС.

Задача выбора главного судового двигателя рассматривается как задача выбора однотипных элементов, имеющих одинаковый набор характеристик.

Большинство методик сводится к выбору оптимизирующей функции (мощность, расход топлива, массогабаритные характеристики и т.д.) и предпочтение отдается минимизации затрат на постройку и эксплуатацию судна. В методике, использующей многокритериальный подход, оцениваются в первую очередь количественные показатели [4] или находят решения задачи, используя множество Парето [5], что является трудоемким процессом, связанным с расчетом целого ряда формул и построения графиков, и редко используется на практике (в конструкторских бюро).

Таким образом, существует необходимость в разработке алгоритма выбора главного судового двигателя, который бы опирался на многокритериальный способ, при этом не был загроможден формулами и достаточно прост в применении на практике.

## 1. Предварительный анализ

На начальном этапе оптимизации выбора главного двигателя необходимо определится с типом судна и районом эксплуатации. Для примера рассматривается ледокол для эксплуатации в Северном Каспии, а также в Волго-Каспийском канале. Оптимальной судовой энергетической установкой для ледокола, эксплуатируемого в морях с заходом в устья рек, а также на мелководье, считается дизель-электрическая установка.

Российские дизелестроительные заводы производят судовые двигатели в узких диапазонах и ориентированы главным образом на диапазон мощностей от 500 до 2000 кВт, согласно [6]. При этом дизели только трех заводов (ОАО «Коломенский тепловозостроительный завод», ОАО «Брянский машиностроительный завод» и ОАО «Звезда») имеют более высокий диапазон мощностей.

В настоящее время насчитывается около пятнадцати зарубежных фирм, выпускающих

СОД и ВОД, наиболее известные из них: MAN Diesel, Wartsila Corp., S.E.M.T. Pielstick, MWM Motores Diesel Ltd, Caterpillar Inc. (США) и Caterpillar Motoren (Германия), Mitsubishi Heavy Industries, Volvo Penta, Cummins и др.

Согласно [6] сравнение технико-эксплуатационных характеристик зарубежных дизелей различных фирм с судовыми дизелями отечественных производителей показывает, что по основным технико-эксплуатационным показателям (форсировке, экономичности, ресурсным показателям и т.д.) зарубежные двигатели превосходят дизели отечественного производства.

Мощность главных двигателей, реально эксплуатируемых в выбранном районе, составляет 3х1550 кВт (Капитан Чечкин, Капитан Букаев) и 3х1605 кВт (Капитан Мецайк). Для проектируемого судна можно задать интервал мощностей с диапазоном 500 кВт, в который бы вошли менее мощные ледоколы. Собранные данные по характеристикам пятнадцати дизель-генераторов для интервала мощностей 1200...1700 кВт следующих фирм: Caterpillar, Трансмашхолдинг, MAN, CUMMINS.

## 2. Критериальный анализ

На следующем этапе проводится анализ по предпочтительным критериям (оптимизирующим функциям). Для примера рассматриваются три характеристики:

- 1) удельный расход топлива на единицу мощности в час –  $g_T$  (г/(кВт·ч));
- 2) массогабаритная характеристика -  $M_{дг} = N / G_{дг}$  (кВт/т);
- 3) удельный габаритный объем –  $g_v$  (л/кВт).

Диаграммы сравнения в зависимости от рассматриваемой характеристики представлены на рис. 1-3.

Согласно диаграммам оптимальными вариантами по выбранным критериям будут следующие: минимальный расход топлива у дизель-генераторов фирмы MAN – 183 г/кВт·ч; максимальная массогабаритная характеристика у дизель-генератора фирмы Трансмашхолдинг марки 8ЧН26/26 – 156,26 кВт/т; минимальный удельный габаритный объем у дизель-генератора фирмы CUMMINS марки QSK50-DM1 – 7,38 л/кВт.

## 3. Комплексный анализ

Выбор двигателя по одной из указанных характеристик исключает оптимизацию по другим характеристикам, из-за чего появляется необходимость комплексного анализа, для которого можно использовать алгоритм принятия решений в условиях неопределенности, используя критерий Лапласа [7], [8].

Если рассматривать показатели, как равнозначные, то можно провести совокупную сравнительную оценку, которая учитывает влияние всех характеристик двигателя.



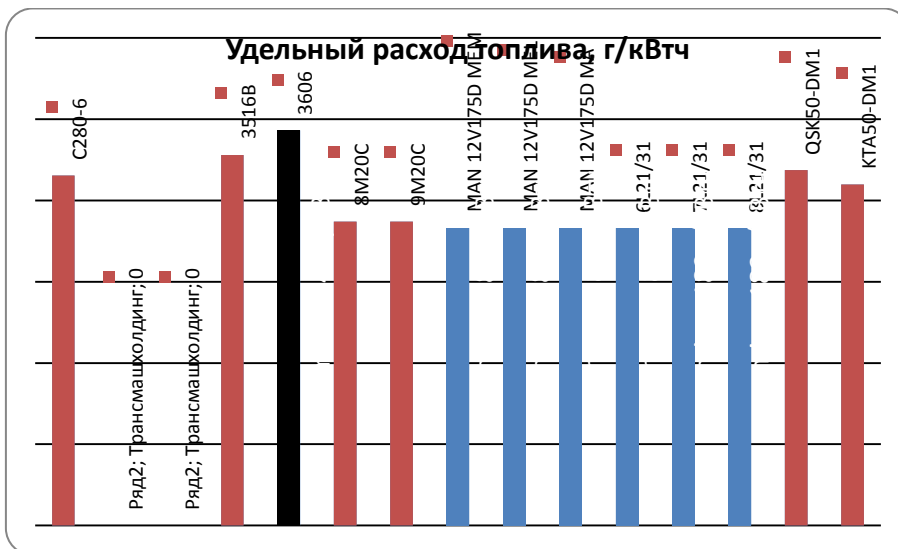


Рис. 1. Удельный расход топлива

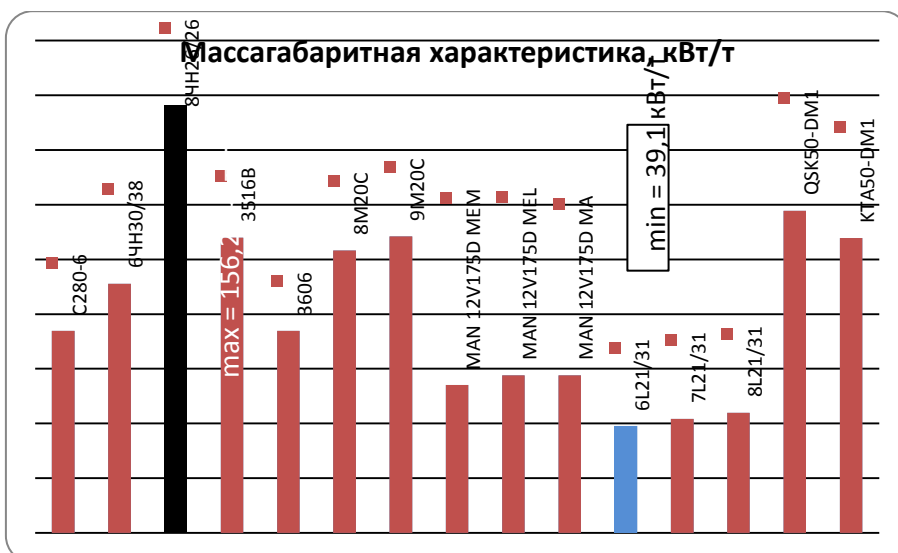


Рис. 2. Массагабаритная характеристика

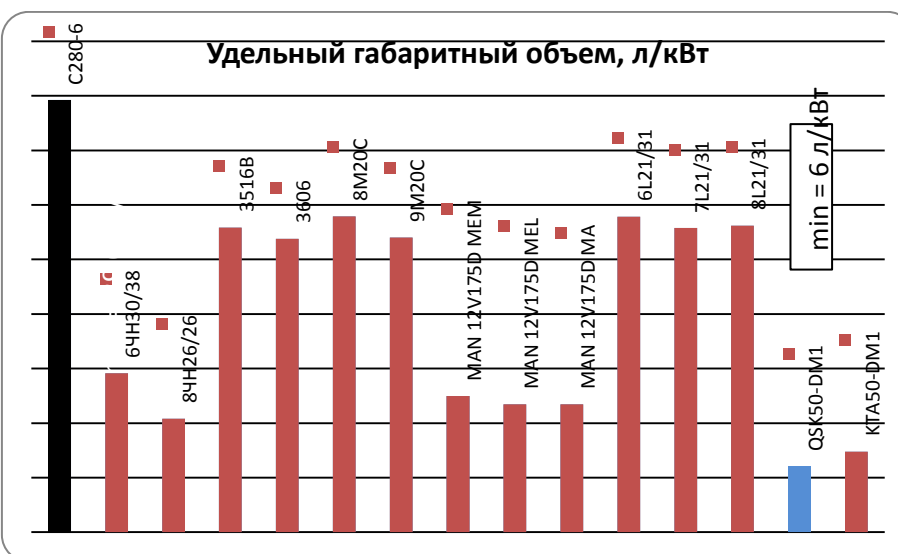


Рис. 3. Удельный габаритный объем

Для принятия решения для каждого двигателя вычисляется арифметическое значение выигрыша в баллах:

$$M_j = \sum_{i=1}^n V_{ij}$$

где:  $j$  – порядковый номер двигателя;

$n$  – количество вариантов решения;

$i$  – порядковый номер критерия;

$V_{ij} = R_{ij} / R_{\max}$  – относительный показатель выгоды;

$R_{ij}$  – значение показателя  $j$ -го варианта решения;

$R_{\max}$  – максимальное значение показателя среди всех вариантов решения.

Для такого показателя, как массогабаритная характеристика (как положительная составляющая оптимальности выбора двигателя) 100% будет соответствовать 5 баллам, а для остальных показателей (для которых оптимальность выбора двигателя соответствует минимальным значениям) 100% будут соответствовать 0 баллов. Таким образом, при суммировании баллов можно судить о целесообразности выбора того или иного двигателя по максимальным полученным значениям. Расчеты приведены в таблице 1.

Комплексный анализ показал:

1 место (12 баллов) – CUMMINS: QSK50-DM1;

2 место (11 баллов) – CUMMINS: KTA50-DM1;

MAN: 12V175D MEM;

12V175D MEL;

12V175D MA;

3 место (10 баллов) –

Трансмашхолдинг: 8ЧН26/26;

Caterpillar: 8M20C; 9M20C.

При этом двигатели фирмы CUMMINS выигрывают за счет небольшого удельного габаритного объема, но являясь ВОД обладают значительной стоимостью по сравнению с СОД. Двигатели фирмы MAN получили высокую оценку из-за малого расхода топлива и минимальных в данной группе габаритных характеристик, несмотря на значительную массу, но также относятся к ВОД. Двигатели фирмы Caterpillar имеют преимущество по удельному расходу топлива при средних оценках по другим показателям. А отечественные двигатели фирмы Трансмашхолдинг получили высокий балл, несмотря на то, что значения расхода топлива не были известны и принимались максимальными для данной группы. Таким образом, предпочтение

целесообразно отдать дизель-генераторам фирмы Caterpillar и Трансмашхолдинг, имеющим оптимальные эксплуатационные и экономические характеристики.

Таким образом, можно представить общий алгоритм выбора главного судового двигателя – рис. 4.

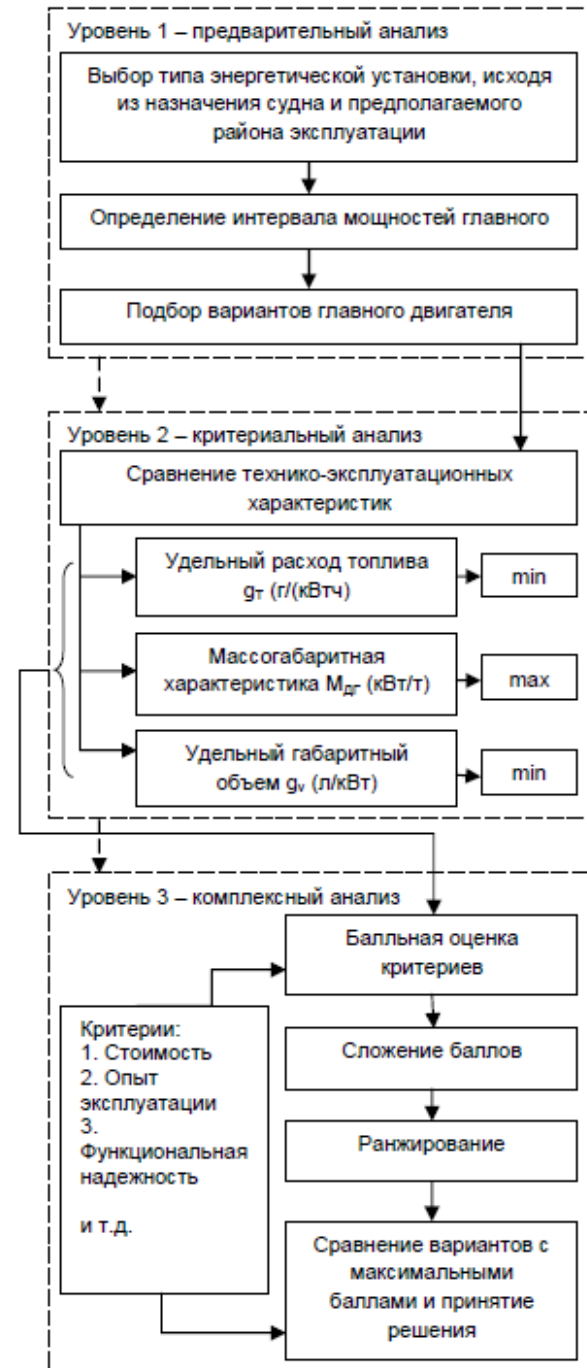


Рис. 4. Алгоритм выбора главного судового двигателя

**Заключение**

Таким образом, на примере ледоколов, эксплуатируемых в Северном Каспии и ВКМСК,

была представлена методика выбора главного судового двигателя, которая позволяет учесть различные критерии и при этом проста в применении на практике.

Таблица №1

**Комплексный анализ двигателей**

Марка	Относительные показатели, доли			Относительные показатели, баллы				Σ, баллы	Марка	Относительные показатели, доли				Относительные показатели, баллы				Σ, баллы
	Удельный расход топлива	Баритная хар-ка	Габаритный	Удельный расход топлива	Баритная хар-ка	Габаритный	Удельный расход топлива			Баритная хар-ка	Габаритный	Удельный расход топлива	Баритная хар-ка	Габаритный				
C280-6	0.89	0.47	1.00	3	2	0	5	12V17 5D MEL	0.75	0.37	0.30	5	1	5	11			
6ЧН30/38	1.00	0.58	0.37	0	3	4	7	12V17 5D MA	0.75	0.37	0.30	5	1	5	11			
8ЧН26/26	1.00	1.00	0.26	0	5	5	10	6L21/31	0.75	0.25	0.73	5	0	2	7			
3516B	0.94	0.69	0.70	2	3	2	7	7L21/31	0.75	0.27	0.70	5	1	2	8			
3606	1.00	0.47	0.68	0	2	2	4	8L21/31	0.75	0.28	0.71	5	1	2	8			
8M20C	0.77	0.66	0.73	5	3	2	10	QSK50-DM1	0.90	0.75	0.15	3	4	5	12			
9M20C	0.77	0.69	0.68	5	3	2	10	KTA50-DM1	0.86	0.69	0.19	3	3	5	11			
12V17 5D MEM	0.75	0.35	0.31	5	1	5	11											

Методика включает в себя помимо предварительного анализа критериальный анализ и комплексный анализ. Использование критериального анализа допустимо при выборе одной оптимизирующей функции. Но такой подход исключает оптимизацию по другим характеристикам, и целесообразней применять комплексный анализ, основанный на методе принятия решений (критерий Лапласа).

Приведенная методика комплексного анализа позволяет также учесть качественные показатели такие, как опыт эксплуатации, функциональность надежность, экологичность и т.д.

**Литература**

1. Судовые энергетические установки / Г.А. Артёмов [и др.]. Л.: Судостроение, 1987. – 480 с.
2. Гордеев П. А., Яковлев Г. В. Выбор главного двигателя судовой дизельной установки. Методические указания / Санкт-Петербург: ЛКИ, 1996. – 83 с.
3. Троицкий Б.Л. Основы проектирования СЭУ / Л.: Судостроение, 1980 – 133 с.
4. Гильмияров Е.Б., Цветков В.В. Многокритериальный подход к выбору судовой энергетической установки // Вестник МГТУ, том 9. 2006. №3. – С. 502-513.
5. Jamlean Faustinus. Main engine selection optimization analysis of the ship Caraca Jaya III based on engineering and economy considerations / KAPAL. Vol. 10, 2013. №2. – С. 65-71.
6. Сорокин В.А., Иванов М.Ю. Техничко-эксплуатационные характеристики отечественных и зарубежных судовых дизелей мощностью до 3 МВт // Наука и транспорт. Морской и речной транспорт, 2013. № 1 (5). – С. 70–77.
7. Митихин В. Г. Основы теории принятия решений / М., МГЭИ, 2007. – 136 с.
8. Черноуцкий И.Г. Методы принятия решений / Санкт-Петербургский политехнический университет, 2012. – 317 с.

**References**

1. Sudovye jenergeticheskie ustanovki. G.A. Artjomov [i dr.]. L.: Sudostroenie, 1987. 480 p.
2. Gordeev P. A., Jakovlev G. V. Vybor glavnogo dvigatelja sudovoj dizel'noj ustanovki. Metodicheskie ukazanija. Sankt-Peterburg: LKI, 1996. 83 p.
3. Troickij B.L. Osnovy proektirovanija SJeU. L.: Sudostroenie, 1980. 133 p.
4. Gil'mijarov, E.B., Cvetkov, V.V. (2006). Mnogokriterial'nyj podhod k vyboru sudovoj jenergeticheskoj ustanovki. Vestnik MGТУ, tom 9, №3, 502-513.
5. Jamlean Faustinus (2013). Main engine selection optimization analysis of the ship Caraca Jaya III based on engineering and economy considerations. KAPAL. Vol. 10, №2, 65-71.
6. Sorokin V.A., Ivanov M.Ju. (2013). Tehniko-jekspluatacionnye harakteristiki otechestvennyh i zarubezhnyh sudovyh dizelej moshhnost'ju do 3 MVt. Nauka i transport. Morskoj i rečnoj transport, № 1 (5), 70–77.
7. Mitihin V. G. Osnovy teorii prinjatija reshenij. M., MGJel, 2007. 136 p.
8. Chernoruckij I.G. Metody prinjatija reshenij. Sankt-Peterburgskij politehnicheskij universitet, 2012. 317 p.

УДК 544.6+66.091+64.066.462

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ В ОБЛАСТИ МОРСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ****Денис Павлович Опра**

кандидат химических наук, руководитель группы  
Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук  
690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159  
e-mail: [dp.opra@gmail.com](mailto:dp.opra@gmail.com)

**Сергей Васильевич Гнеденков**

член-корреспондент РАН, доктор химических наук, директор  
Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук  
690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159  
e-mail: [svg21@hotmail.com](mailto:svg21@hotmail.com)

**Сергей Леонидович Синебрюхов**

доктор химических наук, доцент, заместитель директора  
Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук  
690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159;  
e-mail: [sls@ich.dvo.ru](mailto:sls@ich.dvo.ru)

**Александр Александрович Соколов**

техник первой категории  
Дальневосточный федеральный университет  
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8  
e-mail: [alexokol90@mail.ru](mailto:alexokol90@mail.ru)

**Елена Ивановна Войт**

кандидат химических наук, старший научный сотрудник  
Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук  
690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159  
e-mail: [evoit@ich.dvo.ru](mailto:evoit@ich.dvo.ru)

**Александр Николаевич Минаев**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовой энергетики и автоматики  
Дальневосточный федеральный университет  
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8  
e-mail: [aminaev@mail.ru](mailto:aminaev@mail.ru)

**Вениамин Викторович Железнов**

доктор технических наук, старший научный сотрудник  
Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук  
690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159  
e-mail: [zheleznov\\_sergey@mail.ru](mailto:zheleznov_sergey@mail.ru)

**Аннотация**

Литий-ионные аккумуляторы известны своим обширным использованием в качестве источников энергии общегражданской бытовой техники различной номенклатуры. В последнее время, все больше сообщений появляется об их успешной реализации в виде крупногабаритных энергообеспечивающих модулей для питания, в том числе, необитаемых подводных аппаратов, робототехнических комплексов, гибридного и электроавтотранспорта. В то же время, к главным недостаткам, препятствующим действительно масштабному внедрению литий-ионных аккумуляторов в области крупногабаритных источников энергии, относятся длительный процесс заряда и недостаточная безопасность. Приоритетным направлением решения данной проблемы является поиск новых электродных материалов, обладающих высокой удельной мощностью и имеющих потенциал интеркаляции ионов лития в пределах окна электрохимической стабильности электролита (выше 1.2 В). В этом ключе, в настоящей работе, обсуждена возможность применения диоксида титана, допированного ионами гафния в качестве анода литий-ионного аккумулятора. С использованием широкого набора взаимодополняющих научных методов (КР, СЭМ, ЭДС, заряд/разряд) исследованы структурные, морфологические и электрохимические свойства материала. Продемонстрирована перспективность применения допированного гафнием диоксида титана как электрода безопасного, мощного литий-ионного аккумулятора.

**Ключевые слова:** литий-ионный аккумулятор, анод, диоксид титана, допирование, мощность, безопасность.

## FUNDAMENTAL PROBLEMS OF LITHIUM-ION BATTERIES APPLICATION IN THE AREA OF MARINE TECHNOLOGIES

### Denis P. Opra

Ph.D., head of the group  
Institute of Chemistry of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences  
159, 100-letiya Vladivostoka Pr., Vladivostok, Russia, 690022  
e-mail: [dp.opra@gmail.com](mailto:dp.opra@gmail.com)

### Sergey V. Gnedenkov

Corresponding member of RAS, Sc.D., director  
Institute of Chemistry of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences  
159, 100-letiya Vladivostoka Pr., Vladivostok, Russia, 690022  
e-mail: [svg21@hotmail.com](mailto:svg21@hotmail.com)

### Sergey L. Sinebryukhov

Associate professor, Sc.D., deputy director  
Institute of Chemistry of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences  
159, 100-letiya Vladivostoka Pr., Vladivostok, Russia, 690022  
e-mail: [sls@ich.dvo.ru](mailto:sls@ich.dvo.ru)

### Alexander A. Sokolov

technically qualified person  
Far Eastern Federal University  
8, Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690950  
e-mail: [alexsokol90@mail.ru](mailto:alexsokol90@mail.ru)

### Elena I. Voit

Ph.D., senior researcher  
Institute of Chemistry of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences  
159, 100-letiya Vladivostoka Pr., Vladivostok, Russia, 690022  
e-mail: [evoit@ich.dvo.ru](mailto:evoit@ich.dvo.ru)

### Alexander N. Minaev

Professor, Sc.D., professor, professor of department of ship energy and automation  
Far Eastern Federal University  
8, Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690950  
e-mail: [aminaev@mail.ru](mailto:aminaev@mail.ru)

### Veniamin V. Zhelezov

Sc.D., senior researcher  
Institute of Chemistry of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences  
159, 100-letiya Vladivostoka Pr., Vladivostok, Russia, 690022  
e-mail: [zhelezov\\_sergey@mail.ru](mailto:zhelezov_sergey@mail.ru)

### Abstract

As it is well-known lithium-ion batteries are widely used as power sources for various kinds of household electrical devices. Moreover, their potential application as large-scale battery modules for unmanned submersible crafts, robot systems, hybrid and electric vehicles, was suggested in recent reports. However, some shortcomings, namely long-term charge and insufficient safety, hampered the wide usage of lithium-ion batteries in the area of large-scale energy storage and conversion. Hence, within scopes of problem, the priority was given to search of new electrode materials with high power density and the potential of lithium ions intercalation more than 1.2 V (lower limit of the electrolyte electrochemical window). In this way, in the present work, the possibility of application of hafnium-doped titanium dioxide as anode material for lithium-ion battery was discussed in detail. The structural, morphological and electrochemical properties of the material were studied by wide range of complementary scientific techniques (Raman spectroscopy, SEM, EDX, charge/discharge tests). The availability of titanium dioxide doped with hafnium as an electrode for a safe and powerful lithium-ion battery have been clearly confirmed.

**Key words:** lithium-ion battery, anode, titanium dioxide, doping, power density, safety.

### Введение

В наши дни литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) широко применяются в качестве источников питания портативной техники, бытовых электроинструментов, имплантационных устройств и т.д. вследствие высокого энергозапаса, длительного срока службы, низкого саморазряда [1,2]. В то же время, масштабное

применение ЛИА в направлениях, требующих крупногабаритных модулей энергообеспечения, например, в области необитаемых подводных аппаратов и робототехнических комплексов, ограничено рядом проблем, а именно низкой удельной мощностью и недостаточной безопасностью. Действительно, в современных ЛИА анодом служит литированный углеродсодержащий материал (например,



графитизированный углерод или графит), повышенная активность которого обеспечивает высокое разрядное напряжение источника питания. Вместе с тем, это же является причиной протекания необратимого взаимодействия между материалом анода и компонентами электролитной системы, приводящего к формированию блокирующего твердоэлектродолитного слоя на границе раздела. Последнее приводит к образованию дендритов металлического лития [3]. При этом их рост в виде древовидных игольчатых кристаллов, осуществляющийся особенно интенсивно при высоких плотностях тока (более 1С), отрицательно сказывается на безопасности ЛИА в режимах форсированного заряда [4]. Стоит подчеркнуть, что уровень безопасности современных ЛИА в целом приемлем для маломощных систем, тогда как для крупногабаритных источников энергии, требующих ускоренного заряда, данное обстоятельство является непреодолимым препятствием.

Хорошо известно, что формирование твердоэлектродолитного слоя на поверхности анода можно избежать при потенциале выше 1,2 В (катодный предел электрохимического окна стабильности электролита ЛИА) [5]. Это препятствует образованию дендритов и обеспечивает безопасность ЛИА даже в условиях ускоренного циклирования (вплоть до 20С). С этой точки зрения, перспективными анодными материалами являются кристаллографические модификации диоксида титана (в основном  $\text{TiO}_2$ (анатаз) и оксидная бронза  $\text{TiO}_2$ (В)), обладающие повышенным потенциалом интеркаляции ионов  $\text{Li}^+$  (от 1,5 до 1,8 В) в сравнении с графитом (ниже 0,3 В) [6]. Кроме того,  $\text{TiO}_2$ (анатаз) характеризуется лучшей стабильностью из-за низких объемных изменений (ниже менее 4% для  $\text{TiO}_2$ (анатаз)) по сравнению с графитом (9–10%). С другой стороны, высокая теоретическая удельная емкость (335 мАч/г) обеспечивает диоксиду титана вдвое больший энергозапас по сравнению с  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  (175 мАч/г), который в последнее время активно исследуется по тем же самым причинам [7]. Последнее, но не менее важное, это естественное изобилие, низкая стоимость (по меньшей мере, в три раза в сравнении с  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ) и экологичность  $\text{TiO}_2$ . К сожалению,  $\text{TiO}_2$  характеризуется замедленной диффузией ионов  $\text{Li}^+$  ( $10^{-17}$ – $10^{-9}$  см<sup>2</sup>/с) в кристаллической решетке [8], которая препятствует его применению в качестве анода ЛИА. Кроме того, диоксид титана представляет собой материал полупроводникового типа, обладающий широкой запрещенной зоной (3,2 эВ для анатаза), результатом чего является низкая проводимость ( $10^{-12}$ – $10^{-7}$  См/см) [9], дополнительно ограничивающая электрохимическую производительность ЛИА.

Общезвестно, что наноструктурирование материалов заметно влияет на их физико-химические свойства [10], в то же время, как

показали исследования, переход к наноразмерным формам не является достаточным для получения  $\text{TiO}_2$ (анатаз), пригодного к коммерциализации в качестве анода ЛИА. С другой стороны, эффективным способом модифицирования  $\text{TiO}_2$ (анатаз) является введение в кристаллическую структуру ионов металлов (например,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{W}^{6+}$ ,  $\text{La}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{V}^{5+}$ ) [11–15], приводящее к перераспределению заряда в решетке, облегчению диффузии  $\text{Li}^+$ , повышению дефектности структуры, увеличению ионной/электронной проводимости.

В настоящей работе с использованием темплатного золь-гель метода синтезирован наноструктурированный  $\text{Ti}_{1-x}\text{Hf}_x\text{O}_2$  ( $x = 0; 0,01; 0,03; 0,05$ ) в кристаллографической модификации анатаз. Исследована возможность применения допированного гафнием диоксида титана в качестве анодного материала ЛИА.

## 1. Материалы и методы

Образцы  $\text{Ti}_{1-x}\text{Hf}_x\text{O}_2$  были получены темплатным золь-гель методом. В частности, посредством медленного гидролиза раствора  $\text{TiCl}_4$  с раствором  $\text{HfOCl}_2$  проводили осаждение оксидов на поверхности углеродного темплата, роль которого выполняло активированное углеродное волокно Бусофит Т055 (Беларусь). Для оптимизации концентрации гафния в кристаллической решетке диоксида титана, поддерживались следующие расчетные соотношения  $\text{Hf/Ti}$ : 0,01 ( $\text{Ti}_{0,99}\text{Hf}_{0,01}\text{O}_2$ ), 0,03 ( $\text{Ti}_{0,97}\text{Hf}_{0,03}\text{O}_2$ ) и 0,05 ( $\text{Ti}_{0,95}\text{Hf}_{0,05}\text{O}_2$ ). Кристаллизацию образцов и удаление темплата проводили путем выдержки в атмосфере воздуха при температуре 500 °С в течение 2 часов. Сравнение физико-химических свойств допированного Hf диоксида титана осуществляли относительно недопированного  $\text{TiO}_2$ , синтезированного при тех же условиях, но в отсутствие оксихлорида гафния.

Анализ морфологии проводили методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с помощью Hitachi S5500 (Япония). Распределение элементов исследовали на микроскопе Hitachi TM3000 (Япония) с энергодисперсионной приставкой Bruker Quantax 70 (Германия) для рентгеновского микроанализа. Кристаллическую структуру изучали методом спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) с использованием спектрометра Bruker RFS-100/S (ФРГ).

Электродную массу получали путем смешения в N-метилпирролидоне 80 мас%  $\text{Ti}_{1-x}\text{Hf}_x\text{O}_2$ , 10 мас% ацетиленовой сажи Super P и 10 мас% поливинилиденфторида. С помощью автоматического устройства MTI EQ-AFA-I (США) массу наносили равномерным слоем толщиной 50 мкм на медный токосъемник. Электродную пластину подвергали сушке при 60 °С в течение 5 ч, после чего вырубали электродные диски площадью 1,75 см<sup>2</sup>. Содержание активного вещества на 1 см<sup>2</sup> площади электрода составляло около 2 мг.

Источник тока изготавливали в боксе Plas-Labs 890-NB (США) в атмосфере аргона (99.999%) с использованием двухэлектродного устройства MTI STC-19 (США). Диск металлического лития использовали в качестве катода, а платиновый диск – анода. Электролит представлял собой 1 М раствор LiClO<sub>4</sub> в смеси пропиленкарбоната и диметоксиэтана в соотношении 5:1. Электрохимические испытания проводили с использованием потенциостата/гальваностата Solartron 1470E (Великобритания) в режиме гальваностатического заряда/разряда в диапазоне от 3 до 1 В, при скорости 0,1С. При этом разряд полужаежки соответствовал интеркаляции Li<sup>+</sup>, а заряд – деинтеркаляции.

## 2. Результаты и обсуждение

Согласно результатам СЭМ, образцы Ti<sub>1-x</sub>Hf<sub>x</sub>O<sub>2</sub> (x = 0; 0,01; 0,03; 0,05) обладают схожей морфологией. На рис. 1, в качестве примера, представлены изображения, характеризующие микроструктуру Ti<sub>0,95</sub>Hf<sub>0,05</sub>O<sub>2</sub>. Как следует из полученных данных, материал представляет собой совокупность полых трубок длиной 5–50 мкм. Наружный диаметр микротрубок варьируется в диапазоне 2–5 мкм. Трубки наноструктурированы, их стенки состоят из наночастиц размером 15–20 нм.

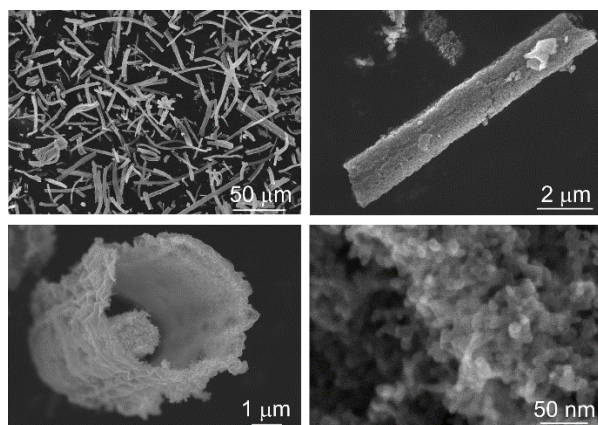


Рис. 1. СЭМ-фото Ti<sub>0,95</sub>Hf<sub>0,05</sub>O<sub>2</sub> образца

Картирование (рис. 2) показало однородное распределение в микротрубках Ti<sub>0,95</sub>Hf<sub>0,05</sub>O<sub>2</sub> элементов Ti, Hf и O. Следовательно, гафний равномерно внедряется в решетку TiO<sub>2</sub>(анатаз). При этом соотношение Hf/Ti составило 0,047, что соответствует расчётному значению (0,05).

КР-спектры (рис. 3) Ti<sub>0,99</sub>Hf<sub>0,01</sub>O<sub>2</sub>, Ti<sub>0,97</sub>Hf<sub>0,03</sub>O<sub>2</sub>, Ti<sub>0,95</sub>Hf<sub>0,05</sub>O<sub>2</sub> и недопированного TiO<sub>2</sub> соответствуют кристаллизации наночастиц в модификации анатаз. При этом, введение Hf<sup>4+</sup> вплоть до Hf/Ti = 0,05 не приводит к изменению фазового состава материала. В то же время наблюдается сдвиг пиков E<sub>g(3)</sub>, B<sub>1g(1)</sub> и E<sub>g(1)</sub> в область низких частот (табл. 1), что свидетельствует об увеличении параметров

элементарной ячейки. Действительно, ионный радиус Hf<sup>4+</sup> составляет 0,71 Å (КЧ = 6), в то время как радиус Ti<sup>4+</sup> равен 0,604 Å (КЧ = 6) [16]. По-видимому, допирование TiO<sub>2</sub>(анатаз) приводит к внедрению ионов Hf<sup>4+</sup> в решетку путем частичного замещения Ti<sup>4+</sup>. При этом, разница в значениях ионных радиусов способствует увеличению параметров элементарной ячейки.

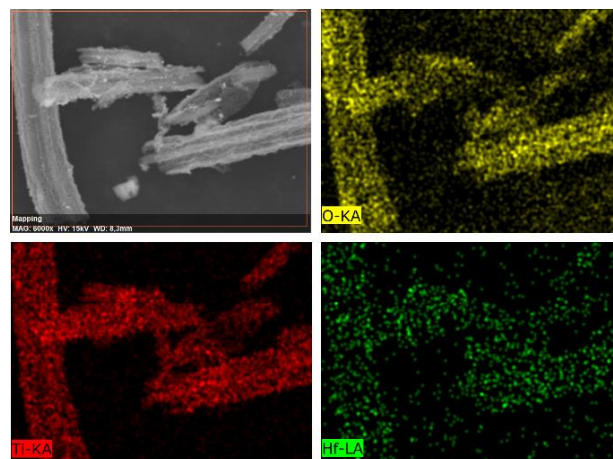


Рис. 2. Распределение элементов в Ti<sub>0,95</sub>Hf<sub>0,05</sub>O<sub>2</sub>

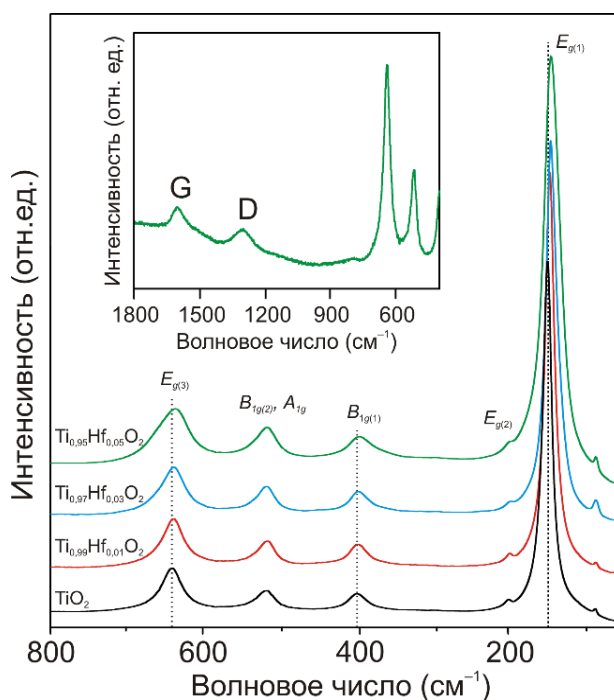


Рис. 3. КР-спектры Ti<sub>1-x</sub>Hf<sub>x</sub>O<sub>2</sub> (x = 0; 0,01; 0,03; 0,05). Вставке показывает D и G полосы в спектре Ti<sub>0,95</sub>Hf<sub>0,05</sub>O<sub>2</sub>

Таблица 1

Зависимость положения пиков  $E_{g(3)}$ ,  $B_{1g(1)}$  и  $E_{g(1)}$  от соотношения Hf/Ti в решетке  $Ti_{1-x}Hf_xO_2$

Hf/Ti	Положение пика (см <sup>-1</sup> )		
	$E_{g(1)}$	$B_{1g(1)}$	$E_{g(3)}$
0,00	147,5	396,9	638,7
0,01	145,5	396,7	638,0
0,03	144,7	396,0	637,1
0,05	143,4	395,1	636,1

Следует отметить, что КР-спектры образцов характеризуются наличием полос углерода, в аморфном D (1305 см<sup>-1</sup>) и кристаллическом G (1590 см<sup>-1</sup>) состояниях, образующегося в результате термообработки Бусофит Т055 при 500 °С (рис. 3, вставка).

Для того чтобы оценить массовую долю углерода, содержащегося в синтезированных материалах  $Ti_{1-x}Hf_xO_2$  (x = 0; 0,01; 0,03; 0,05) были проведены исследования методом ТГА (рис. 4). Полученные данные показывают, что потери массы для всех образцов происходят в три стадии. Первая стадия в интервале температур до 200 °С соответствует удалению молекул H<sub>2</sub>O, адсорбированных на поверхности TiO<sub>2</sub>(анатаз) [17]. Второй этап потери массы в диапазоне от 200 до 650 °С определяется разложением углеродного темплата Бусофит Т055 (рис. 4, вставка). Третий участок между 650 и 850 °С согласуется с протеканием процесса дегидратации Ti(OH)<sub>2</sub>, присутствующего на поверхности диоксида титана [18]. Таким образом, общая потеря массы для образцов варьируется в диапазоне от 2,5 до 5,5%.

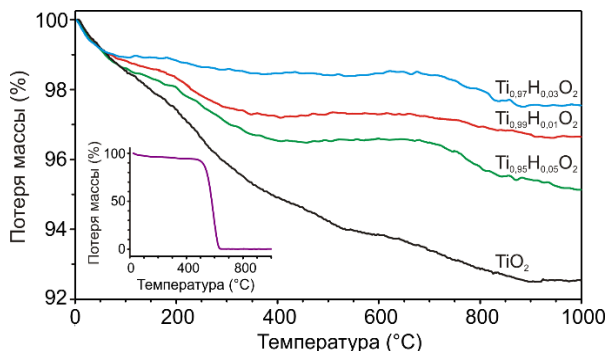
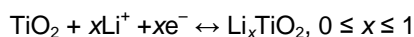


Рис. 4. Зависимость потери массы от температуры для образцов  $Ti_{1-x}Hf_xO_2$  (x = 0; 0,01; 0,03; 0,05) и темплата Бусофит Т055 (вставка)

На рисунке 5а представлены кривые заряда/разряда первого цикла для образцов  $Ti_{0,99}Hf_{0,01}O_2$ ,  $Ti_{0,97}Hf_{0,03}O_2$ ,  $Ti_{0,95}Hf_{0,05}O_2$  и недопированного  $TiO_2$ . Как следует из полученных данных, разрядная (интеркаляционная) емкость для всех образцов достигает 290–320 мА·ч/г, что близко к максимальной теоретической емкости диоксида титана – 335 мА·ч/г:



Заряд первого цикла характеризует обратный процесс – деинтеркаляцию катионов лития из структуры материала. При этом, обратимая емкость недопированного  $TiO_2$  составляет 116 мА·ч/г (0,35 Li<sup>+</sup> на единицу диоксида титана), в то время как, емкость образцов, допированных Hf, достигает 135 мА·ч/г ( $Ti_{0,99}Hf_{0,01}O_2$ ), 149 мА·ч/г ( $Ti_{0,97}Hf_{0,03}O_2$ ) и 178 мА·ч/г ( $Ti_{0,95}Hf_{0,05}O_2$ ), что соответствует 0,40, 0,45, и 0,53 Li<sup>+</sup> на структурную единицу  $TiO_2$ .

По результатам 35-кратного циклирования (рисунок 5б) деинтеркаляционная емкость достигает 56 мА·ч/г ( $TiO_2$ ), 66 мА·ч/г ( $Ti_{0,99}Hf_{0,01}O_2$ ), 87 мА·ч/г ( $Ti_{0,97}Hf_{0,03}O_2$ ) и 154 мА·ч/г ( $Ti_{0,95}Hf_{0,05}O_2$ ). Таким образом, материал  $Ti_{0,95}Hf_{0,05}O_2$  обладает наибольшей стабильностью при интеркаляции/деинтеркаляции Li<sup>+</sup> в/из кристаллической структуры(ы), что, по всей видимости, связано с увеличением параметров элементарной ячейки в результате внедрения ионов Hf<sup>4+</sup>. Стоит отметить, что в целом, результаты, полученные для наноструктурированного  $TiO_2$ (анатаз), допированного Hf, выше, чем для наночастиц  $TiO_2$ , допированного Nb, (128 мА·ч/г и 92 мА·ч/г после 20-ти кратного циклирования при скорости C/20 и C/5, соответственно) [19]. С другой стороны, в работе [20] сообщается о существенном улучшении стабильности циклирования (160 мА·ч/г после 100 цикла при скорости C/6) допированного Nb мезопористого  $TiO_2$  с удельной поверхностью 128 м<sup>2</sup>/г. Т.е. зависимость между способом синтеза, морфологией и электрохимическими характеристиками материала очевидна. В этой связи, прямое сравнение электрохимических параметров образцов допированного  $TiO_2$  с недопированным, проведенное в настоящей работе, является наглядным опытным подтверждением положительного влияния Hf<sup>4+</sup> на циклируемость  $Ti_{1-x}Hf_xO_2$ .

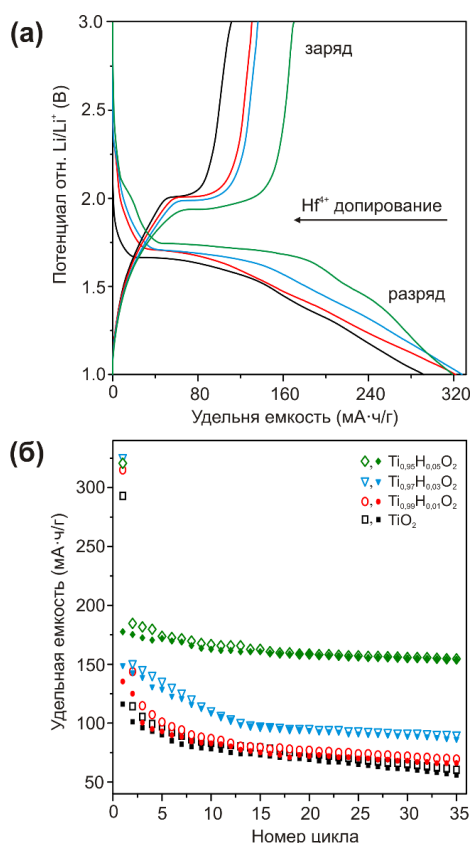


Рис. 5. (а) Кривые заряда/разряда первого цикла и (б) циклируемость (пустые значки – разряд, заполненные – заряд) для  $Ti_{1-x}Hf_xO_2$  ( $x = 0; 0,01; 0,03; 0,05$ ) при скорости  $0,1C$

### Заключение

С использованием темплатного золь-гель метода синтезированы материалы на основе допированного гафнием диоксида титана ( $Hf/Ti = 0,01; 0,03; 0,05$ ). Продемонстрировано, что материалы представляют собой трубки (длина 5–50 мкм, диаметр 2–5 мкм), сконструированные из наночастиц (размер 15–20 нм). Установлено, что  $Hf^{4+}$  равномерно внедряется в позиции  $Ti^{4+}$  в структуре  $TiO_2$ , формируя твердые растворы  $Ti_{1-x}Hf_xO_2$  ( $x = 0,01; 0,03; 0,05$ ) со структурой анатаз. Исследование поведения  $Ti_{1-x}Hf_xO_2$  в качестве анодов ЛИА показывает, что как удельная емкость материалов, так их стабильность при циклировании существенно повышаются в результате внедрения  $Hf^{4+}$ . В частности, в результате 35-кратного циклирования при скорости  $0,1C$  в диапазоне напряжений 3–1 В обратимая емкость допированного гафнием  $TiO_2$  достигает  $154 \text{ mA}\cdot\text{ч/г}$  ( $Ti_{0,95}Hf_{0,05}O_2$ ), что существенно выше по сравнению с недопированным диоксидом титана –  $56 \text{ mA}\cdot\text{ч/г}$ . Обнаруженное явление объясняется более открытой кристаллической структурой  $Ti_{1-x}Hf_xO_2$  ( $x = 0,01; 0,03; 0,05$ ), что достигается в результате замещения ионов  $Ti^{4+}$  (радиус  $0,604 \text{ \AA}$ ) ионами  $Hf^{4+}$  ( $0,71 \text{ \AA}$ ).

### Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-73-10131). За участие в проведении экспериментов авторы выражают благодарность сотрудникам Института химии ДВО РАН: Ю.В. Сушкову и В.Г. Курявому.

### Литература / References

1. Kang H. S., Cho H., Panatdasirisuk W., Yang S., *J. Mater. Chem. A*, 5 (2017) 17174.
2. Kulova T. L., Skundin A. M., *Russ. J. Electrochem.*, 52 (2016) 501.
3. Zhao S., Zhang M. M., Xian X. C., Ka O., Wang Z. H., Wang J., *J. Mater. Chem. A*, 5 (2017) 13740.
4. Nikiforova P. A., Stenina I. A., Kulova T. L., Skundin A. M., Yaroslavtsev A. B., *Inorg. Mater.*, 52 (2016) 1137.
5. Jiang C., Zhang J., *J. Mater. Sci. Technol.*, 29 (2013), 97
6. Ryu W.-H., Nam D.-H., Ko Y.-S., Kim R.-H., Kwon H.-S., *Electrochim. Acta*, 61 (2012) 19.
7. Bresser D., Paillard E., Passerini S., in *Advances in Batteries for Medium and Large-Scale Energy Storage*, ed. Menictas C., Skyllas-Kazacos M., Lim T. M., Woodhead Publishing, Sawston, Cambridge, 2015, 213 p.
8. Lübkea M., Johnson I., Makwana N. M., Brett D., Shearing P., Darr J. A., *J. Power Sources*, 294 (2015) 94.
9. Liang K., Chen X., Guo Z., Hou T., Zhang X., Li Y., *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 18 (2016) 24370.
10. Lewis C. S., Li Y. R., Wang L., Li J., Stach E. A., Takeuchi K. J., Marschilok A. C., Takeuchi E. S., Wong S. S., *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 4 (2016) 6299.
11. Wang Y., Chen T., Mu Q., *J. Mater. Chem.*, 21 (2011) 6006.
12. Duan J., Hou H., Liu X., Yan C., Liu S., Meng R., Hao Z., Yao Y., Liao Q., *J. Porous Mater.*, 23 (2016) 837.
13. Zhang J., Zhang J., Ren H., Yu L., Wu Z., Zhang Z., *J. Alloy. Compd.*, 609 (2014) 178.
14. Anh L. T., Rai A. K., Thi T. V., Gim J., Kim S., Shin E.-C., Lee J.-S., Kim J., *J. Power Sources*, 243 (2013) 891.
15. Thi T. V., Rai A. K., Gim J., Kim S., Kim J., *J. Alloy. Compd.*, 598 (2014) 16.

- 
16. Shannon R. D., *Acta Cryst.*, 1976, A32, 751.
  17. Lai Y., Liu W., Li J., Zhang K., Qin F., Wang M., Fang J., *J. Alloy. Compd.*, 666 (2016) 254.
  18. Han C., Yang D., Yang Y., Jiang B., He Y., Wang M., Song A.-Y., He Y.-B., Li B., Lin Z., *J. Mater. Chem. A*, 3 (2015), 13340.
  19. Fehse M., Cavaliere S., Lippens P. E., Savych I., Iadecola A., Monconduit L., Jones D. J., Rozière J., Fischer F., Tessier C., Stievano L., *J. Phys. Chem. C*, 117 (2013) 13827.
  20. Wang Y., Smarsly B. M., Djerdj I., *Chem. Mater.*, 22 (2010) 6624.

**ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

УДК 623.98: 534.222: 004.93'1

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА НЕЙРОСЕТЕВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ  
МОРСКИХ ЦЕЛЕЙ****Валерий Александрович Пятакович**

кандидат технических наук, доцент, профессор АВН  
начальник научно-исследовательской лаборатории  
Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова  
690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6  
e-mail: pva.877com@mail.ru

**Анна Михайловна Василенко**

кандидат технических наук  
научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории  
Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова  
690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6  
e-mail: kahunya@gmail.com

**Виктория Феликсовна Рычкова**

начальник управления научно-исследовательской и инновационной деятельности  
Морской государственный университет имени адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50 – а  
e-mail: rychkova@msun.ru

**Аннотация**

В статье представлены результаты исследований авторов по разработке способа и системы классификации морских технических объектов, на основе технологий искусственных нейронных сетей и методики их обучения с использованием библиотеки математически обработанных образов спектрограмм морских целей. Система должна обеспечивать обнаружение источников гидроакустических сигналов в режиме шумопеленгования, их автоматическое распознавание и классификацию по амплитудно-частотным характеристикам на основе нейросетевых технологий и оперативно обновляемой библиотеки математически обработанных образов спектрограмм морских целей. Процесс формирования информационных массивов необходим для решения двух задач, первая из которых представляет собой процесс формирования эталонных образцов, необходимых для реализации процесса обучения распознающей сети, и вторая для распознавания целей. Распознавание и классификация морских целей по признакам их полей с помощью вычислительных операций нейронных сетей позволяет ускорить процесс распознавания и повысить вероятность классификации как надводных, так и подводных целей.

**Ключевые слова:** Классификация морских объектов, образы морских объектов, обучающие алгоритмы нейронных сетей, этапы формирования обучающей выборки.

**INTELLIGENT SYSTEM OF NEURAL NETWORK CLASSIFICATION OF  
MARINE TARGETS****Valeriy A. Pyatakovich**

Associate Professor Cand. Tech. Sci., Professor of the Academy of Military Sciences,  
Chief of the Research Laboratory, The Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov  
Kamskiy lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia  
e-mail: pva.877com@mail.ru

**Anna M. Vasilenko**

Cand. Tech. Sci., Researcher of a Research Laboratory  
The Pacific Higher Naval College named after Admiral Makarov  
Kamskiy lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia  
e-mail: kahunya@gmail.com.

**Victoria F. Rychova**

Chief of the Department of Research and Innovation Activities  
Maritime state university named Admiral Nevelskoi  
Verkhneportovaya, 50 – a, Vladivostok, 690059, Russia  
e-mail: rychkova@msun.ru



**Abstract**

The article presents the results of the authors' research on development of the classification method and system of marine engineering objects on the basis of the artificial neural network technologies and their training algorithms with the application of mathematically treated images library of marine targets spectrograms. This system shall provide detection of the hydro acoustic signals sources in listening mode as well as their automatic recognition and classification according to amplitude-frequency characteristics in terms of neural network technologies and efficiently updated mathematically treated images library of marine targets spectrograms. The information collection shaping process is necessary for solving two tasks - the first one is the reference specimen formation process required for carrying out the recognition network training process and the second one is directly target recognition.

The recognition and classification of marine targets by their field features using computational operations performed by neural networks allow to accelerate the recognition and to increase the probability of surface and underwater targets classification.

**Keywords:** Classification of marine engineering objects, images of marine objects, training algorithms of neural networks, reference specimen formation process.

**Введение**

В качестве априорных данных о свойствах шумового сигнала от объекта можно использовать данные об узкополосных дискретных компонентах сигнала (дискретных составляющих), которые фактически представляют собой набор элементарных непрерывных синусоидальных сигналов соответствующей частоты. В этом случае можно говорить о решении задачи обнаружения полигармонического сигнала на фоне помехи. Известно устройство на основе квадратурного приемника [1], которое обнаруживает шумовые гидроакустические сигналы в виде дискретных составляющих на фоне аддитивной помехи. Алгоритм работы устройства основан на квадратурном детектировании в каждом частотном канале. Использование большего объема априорной информации об обнаруживаемом полезном сигнале позволяет увеличивать помехоустойчивость обнаружителя широкополосных сигналов и, соответственно, дальность действия гидроакустической системы шумопеленгования.

**1. Результаты исследования и их обсуждение**

Авторами проведена дальнейшая разработка структурной схемы устройства с целью создания системы обнаружения гидроакустических сигналов и их нейросетевой классификации. Система должна обеспечивать обнаружение источников гидроакустических сигналов в режиме шумопеленгования, их автоматическое распознавание и классификацию по амплитудно-частотным характеристикам на основе нейросетевых технологий и оперативно обновляемой библиотеки математически обработанных образов спектрограмм морских целей. Результат достигается тем, что в известное устройство [1] введен тракт нейросетевого распознавания и классификации целей, содержащий блок распознавания класса цели по амплитудно-частотной характеристике,

охваченный обратной связью с блоком обучения; при этом блок распознавания класса цели по амплитудно-частотной характеристике выполнен в виде трехслойного персептрона на выходе которого формируются сигналы по количеству типов целей, согласно степени принадлежности исследуемой области спектра объекту классификации.

Обнаружение гидроакустических сигналов и извлечение из них полезной информации определяет основы алгоритмизации обработки данных в интеллектуальной системе классификации морских целей [2, 6]. Процесс формирования информационных массивов необходим для решения двух задач, первая из которых представляет собой процесс формирования эталонных образцов, необходимых для реализации процесса обучения распознающей сети, и вторая для распознавания целей [3–6].

Для формирования вектора признаков, являющегося входным информационным массивом распознающей сети, используется метод масок. Идея метода состоит в том, что для каждой маски ищется максимальное амплитудное значение, которое и является ортом вектора классификационных признаков. Для автоматизации процесса поиска экстремума в зоне одной маски использовалась сеть поиска максимума MAXNET (сеть циклического функционирования). Нормализация входного вектора признаков, полученного после анализа масок сетью MAXNET, производится согласно выражения:

$$x_i = \frac{(\tilde{x}_i - x_i^{min})}{(x_i^{max} - x_i^{min})},$$

где  $\tilde{x}_i$  – средняя величина для диапазона значений;  $x_i^{max}, x_i^{min}$ , – границы диапазона значений определяемые моделью входного гидроакустического сигнала.

Обучение распознающей сети производится на основе алгоритма обратного распространения ошибки [4, 6–8], реализующего градиентный метод оптимизации функционала вида:

$$F = \|Y(T, X^*) - Y^*\|^2,$$

где  $T$  – вектор синаптических весов сети;

$(X^*, Y^*)$  – обучающие пары;  $\|\dots\|$  – норма вектора.

**2. Сущность способа формирования системы нейросетевой классификации**

Сущность способа и реализующей его системы обнаружения гидроакустических сигналов и их нейросетевой классификации заключается в следующем. Как видно из структурной схемы, представленной на рис. 1,

реализация входного процесса  $x(t)$  поступает на вход аналого-цифрового преобразователя АЦП (блок 1) с частотой дискретизации, удовлетворяющей требованиям теоремы Котельникова. С выхода АЦП (блок 1) дискретные отсчеты поступают на вход рециркулятора (блок 2), где формируется и с каждым новым отсчетом обновляется текущая дискретная выборка  $x(n)$  длиной  $N$  отсчетов.

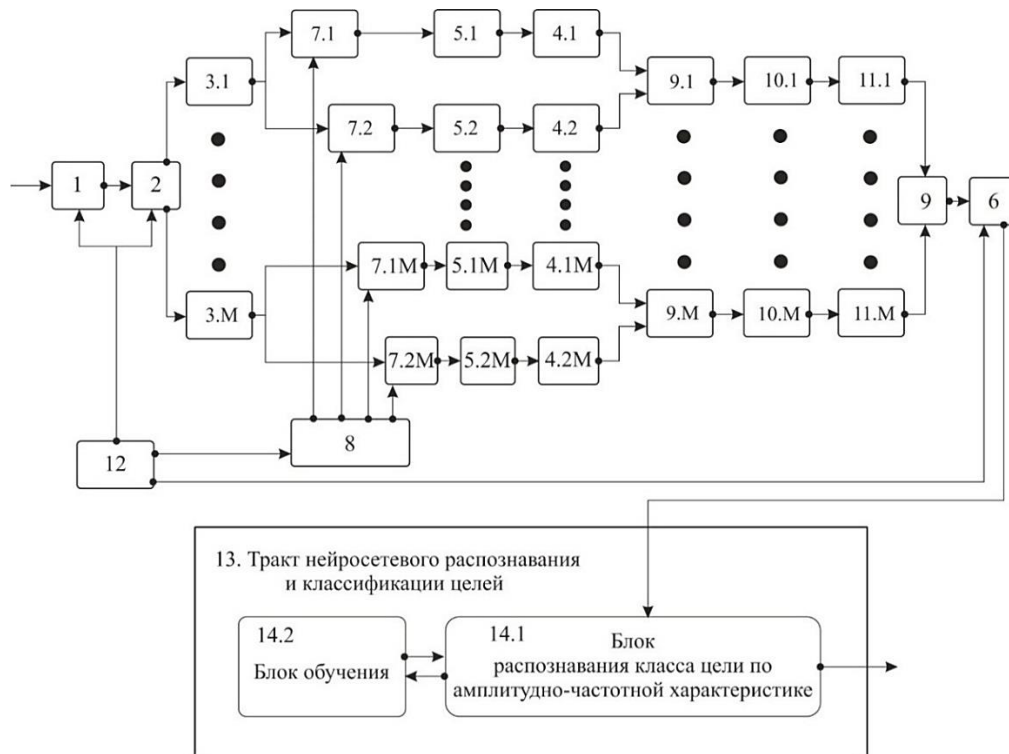


Рис. 1 Структурная схема системы обнаружения гидроакустических сигналов и их нейросетевой классификации

Сформированная текущая дискретная выборка входного процесса  $x(n)$  поступает одновременно на входы  $M$  узкополосных фильтров (блоки 3.1–3.M).

С выходов  $M$  узкополосных фильтров (блоки 3.1–3.M)  $M$  соответствующих узкополосных процессов одновременно поступают на первые входы  $M$  пар умножителей (блоки 7.1–7.2M), с выходов которых результаты умножения поступают на входы  $M$  пар интеграторов (блоки 5.1–5.2M). Время анализа (интегрирования) в полосе каждого фильтра будет определяться выражением:

$$T_M = \frac{1}{f_M},$$

где  $f_M$  – центральные частоты узкополосных фильтров.

Из постоянного запоминающего устройства (блок 8) на вторые входы  $M$  пар умножителей (блоки 7.1–7.2M) поступают  $M$  пар синусных и косинусных составляющих (монокроматических) цифровых сигналов с частотами, соответствующими центральным

частотам  $f_M$  узкополосных фильтров.

С выходов  $M$  пар интеграторов (блоки 5.1–5.2M) результаты интегрирования поступают на входы  $M$  пар квадраторов (блоки 4.1–4.2M), с выходов которых квадраты откликов попарно поступают на входы  $M$  сумматоров (блоки 9.1–9.M), с выходов которых результаты суммирования поступают на входы  $M$  вычислителей квадратного корня (блоки 10.1–10.M), с выходов которых результаты вычислений поступают на входы  $M$  устройств задержки (блоки 11.1–11.M). В случае накопления откликов от нескольких каналов обнаружителя (суммирования выходных процессов) необходимо согласование по времени анализа, т.е. введение временных задержек на выходах каналов перед операцией суммирования. Для гребенки из  $M$  фильтров параметры задержки в каждом частотном канале можно определить по формуле:

$$\tau_M = \frac{f_M - f_1}{f_1 f_M},$$

где  $f_1, f_M$  – центральные частоты

соответствующих узкополосных фильтров.

Введение операции накопления откликов обусловлено необходимостью повышения эффективности обнаружения звукоряда полигармонического сигнала и учета возможного влияния эффекта Доплера при взаимном перемещении приемника и источника сигнала.

С выходов М устройств задержки (блоки 11.1–11.М) отклики поступают на входы сумматора (блок 9), с выхода которого результат суммирования поступает на вход порогового устройства (блок 6), где принимается решение о наличии или

отсутствии сигнала. Далее сигнал с выхода порогового устройства (блок 6) передается на вход блока распознавания класса цели по амплитудно-частотной характеристике (блок 14.1) тракта нейросетевого распознавания и классификации целей (блок 13). Задача распознавания и классификации надводных и подводных источников гидроакустических сигналов решается с помощью трехслойной нейронной сети (рис. 2), которая распознает семь объектов и позволяет выделить один неизвестный класс, что в перспективе позволит значительно расширить круг распознаваемых морских технических объектов.

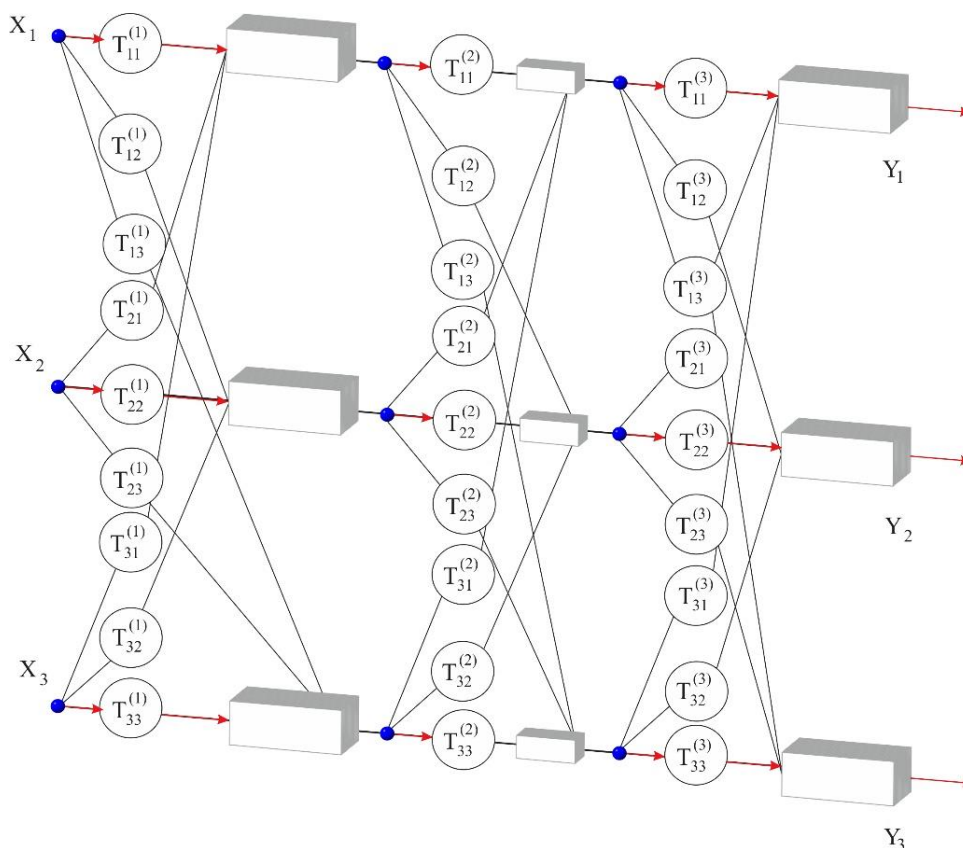


Рис. 2. Структура распознающей сети

Анализ низкочастотной, среднечастотной и высокочастотной составляющих амплитудно-частотной характеристики производится отдельно, так как генеральные признаки для различных типов объектов могут находиться в различных частотных диапазонах.

Нейроны, составляющие распознающую сеть, одинаковы и имеют функцию активации известного типа:

$$y_n^{(i)} = \frac{1}{\pi} \arctg \left[ \sum_{r=1}^{N_i} T_{rn}^{(i)} x_{2n}^{(i)} + I_n^{(i)} \right] + 0.5,$$

где  $x_{2n}^{(i)}$ ,  $y_n^{(i)}$  и  $I_n^{(i)}$  – значения  $n$ -го входного сигнала, выходного сигнала и внешнего смещения  $n$ -го нейрона  $i$ -го слоя;  $N_i$  – число нейронов в  $i$ -м слое;  $i = 1, 2, 3$ .

Как показано на рис. 2, на нейроны первого

слоя через синапсы с весами  $\{T_{ij}^{(1)}\}$ ,  $i = 1,2,3$ ;  $j = 1,2,3$  подаются компоненты входного вектора  $\vec{X} = (x_1, x_2, x_3)$ . На каждый нейрон второго слоя через синапсы с весами  $\{T_{ij}^{(2)}\}$ ,  $i = 1,2,3$ ;  $j = 1,2,3$  подаются выходные сигналы первого слоя. На нейроны третьего слоя через синапсы с весами  $\{T_{ij}^{(3)}\}$ ,  $i = 1,2,3$ ;  $j = 1,2,3$  подаются выходные сигналы второго слоя. Значения выходных сигналов третьего слоя образуют вектор решений  $\vec{Y} = Y(y_1, y_2, y_3)$  элементы которого представлены в табл. 1.

Таблица 1.  
Интерпретация трехмерного выходного вектора распознавания гидроакустических сигналов по амплитудно-частотной характеристике

N/N	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	Интерпретация признака
1.	0	0	0	Неизвестный объект
2.	0	0	1	Объект № 1
3.	0	1	0	Объект № 2
4.	0	1	1	Объект № 3
5.	1	0	0	Объект № 4
6.	1	0	1	Объект № 5
7.	1	1	0	Объект № 6
8.	1	1	1	Объект № 7

Набор выходных сигналов блока распознавания класса цели по амплитудно-частотной характеристике (блок 14.1) поступает в память блока обучения (блок 14.2), где происходит сравнение результатов с математическими образами спектрограмм морских объектов для формирования вывода о степени принадлежности исследуемой области спектра объекту классификации, а настройка весовых коэффициентов распознающей сети определяется алгоритмом обратного распространения ошибки.

Основная идея которого состоит в распространении сигналов ошибки от выходов сети к её входам, в направлении, обратном прямому распространению сигналов в обычном режиме работы. Для возможности применения метода обратного распространения ошибки необходимо, чтобы передаточная функция нейронов была дифференцируема. На выходе блока 14.1 формируются сигналы, согласно количеству типов целей, выход которого является выходом системы.

### 3. Результаты вычислительного эксперимента

На рис. 3 и рис. 4 представлены результаты вычислительного эксперимента по определению коэффициента распознавания (классификации), определяемого как отношение числа распознанных объектов к общему числу испытаний в процентах, для надводных и подводных объектов в условиях зашумления сигнала в диапазоне от -10 до 20 дБ. Как видно из рисунков, распознавание и классификация морских целей с помощью вычислительных операций сети персептрон позволяет повысить вероятность классификации как надводных, так и подводных целей на 5–7%.

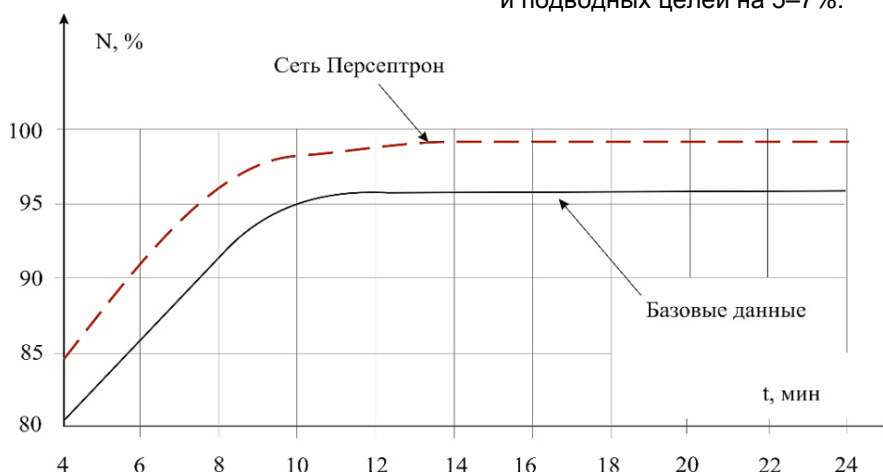


Рис. 3. Зависимость коэффициента распознавания подводного объекта от времени обработки сигналов

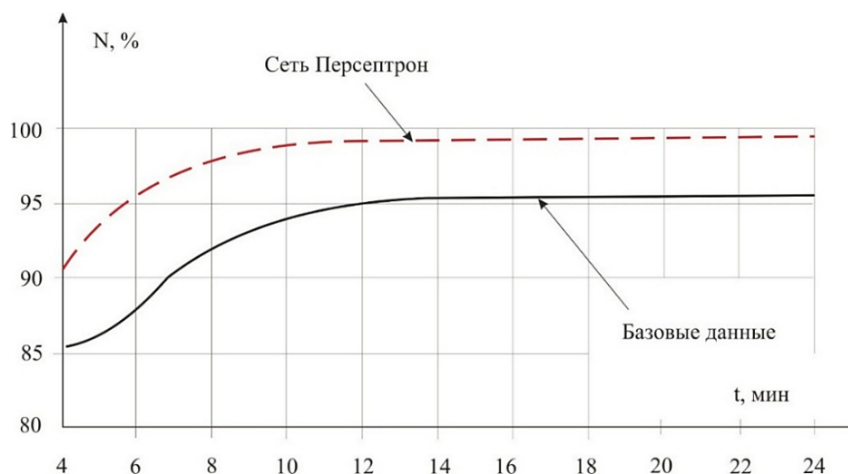


Рис. 4. Зависимость коэффициента распознавания надводного объекта от времени обработки сигналов

### Заключение

Таким образом используя оперативно обновляемую библиотеку математически обработанных образов спектрограмм морских целей и распознающую нейронную сеть в виде трехслойного персептрона, можно в

автоматическом режиме распознавать класс цели по амплитудно-частотной характеристике и делать вывод о степени принадлежности исследуемой области спектра объекту классификации.

### Литература

1. Патент РФ №2549207. Устройство обнаружения шумовых гидроакустических сигналов на основе квадратурного приемника / Смагулов А.Б., Бутырский Е.Ю., Шаталов Г.В.
2. Пятакович В.А., Василенко А.М., Рычкова В.Ф. Новые технологии формирования системы мониторинга и идентификации признаков полей морских объектов // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – №4 (38). – С.127-131.
3. Богданов В.И., Пятакович В.А., Назаренко П.К. Принцип автоматического распознавания образа цели. Труды 5 международной конференции «Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов». – Ульяновск, 2003. – С. 31-32.
4. Пятакович В.А., Василенко А.М., Хотинский О.В. Распознавание и классификация источников формирования полей различной физической природы в морской среде: монография. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2017. – 255 с.
5. Пятакович В.А., Филиппов Е.Г. Нейросетевая система в задаче управления распознаванием сложного технического объекта в морской среде // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – Вып. 7. – С. 239-246.
6. Пятакович В.А., Василенко А.М., Хотинский О.В. Нейросетевые технологии в интеллектуальных системах обнаружения и оперативной идентификации морских целей: монография. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2018. – 263 с.
7. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018612169 РФ. Программно-вычислительный комплекс имитационного моделирования морской информационной ситуации при идентификации целей / Василенко А.М., Пятакович В.А.; 2017.
8. Патент РФ № 2593624. Радиогидроакустическая система передачи информационных волн из морской среды в атмосферу и обратно / Мироненко М.В., Василенко А.М., Пятакович В.А.; 2016

### References

1. Smagulov A.B., Butyrskij E.YU., SHatalov G.V. and others. Ustrojstvo obnaruzheniya shumovyh gidroakusticheskikh signalov na osnove kvadraturnogo priemnika [A device for detecting noise gyroacoustic signals based on a quadrature receiver]. Patent RF No2549207.
2. Pyatakovich, V. A., Vasilenko, A. M., & Rychkova, V. F. (2017). New technologies to build a system for the monitoring and identification of signs of fields belonging to seawater objects. Marine intellectual technologies, 4(38), 127-131.
3. Bogdanov V.I., Pyatakovich V.A., Nazarenko P.K. Princip avtomaticheskogo raspoznavaniya obraza celi. Trudy 5 Mezhdunarodnoj konferencii «Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh, ehkonomicheskikh, tekhnicheskikh, social'nyh sistem i processov» (Proc. 5<sup>th</sup> Int. conf. «Mathematical modeling of physical, economic, technical, social systems and processes»). Ulyanovsk, 2003. pp. 31-32.
4. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Hotinskij O.V. Raspoznavanie i klassifikaciya istochnikov formirovaniya polej razlichnoj fizicheskoy prirody v morskoy srede [Recognition and classification of the sources of the formation of fields of different physical nature in the marine environment]. Vladivostok, Mor. gos. un-t Publ., 2017. 255 p.
5. Pyatakovich, V. A., Filippov, E. G. (2017). Neuronet system of the task of managing the recognition of a complex technical object in the marine environment. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki, 7, 239-246.
6. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Hotinskij O.V. Nejrosetevye tekhnologii v intellektual'nyh sistemah obnaruzheniya i operativnoj identifikacii morskikh celej [Neural network technologies in intelligent detection systems and operational identification of marine targets]. Vladivostok, Mor. gos. un-t Publ., 2018. 263 p.
7. Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A. Programmno-vychislitel'nyj kompleks imitacionnogo modelirovaniya morskoy informacionnoj situacii pri identifikacii celej [Software complex of simulation of the marine information situation in the identification of targetc]. Inventor's certificate RF No. 2018612169, 2017.
8. Mironenko M.V., Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A. Radiogidroakusticheskaya sistema peredachi informacionnyh voln iz morskoy srede v atmosferu i obratno [Radio-hydroacoustic system for transfer of information waves from the marine environment to the atmosphere and back]. Patent RF No2593624, 2016.

УДК 623.98: 534.222: 004.93`1

## СПОСОБ КЛАССИФИКАЦИИ ПОДВОДНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ЭКСПЕРТНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ С ПРИЕМНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АНТЕННОЙ

**Анна Михайловна Василенко**

кандидат технических наук  
научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории  
Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова  
690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6  
e-mail: kahunya@gmail.com

**Валерий Александрович Пятакович**

кандидат технических наук, доцент, профессор АВН  
начальник научно-исследовательской лаборатории  
Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова  
690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6  
e-mail: pva.877com@mail.ru

**Виктория Феликсовна Рычкова**

начальник управления научно-исследовательской и инновационной деятельности  
Морской государственный университет имени адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50 – а  
e-mail: rychkova@msun.ru

### Аннотация

В статье представлена функциональная схема устройства измерения дальности. Способность варьировать и подбирать характеристики сигнала является важным фактором развития современных гидролокационных систем, использующих сложные методы обработки сигналов. Рассмотренные закономерности корреляционной обработки сигналов могут быть реализованы в просветных системах мониторинга при использовании многоканального режима приема сигналов разности фаз. При этом в качестве опорных сигналов в тракте приема и обработки могут использоваться сигналы тракта формирования и излучения, передаваемые по радиоканалу. При этом достигается более высокая разрешающая способность по дальности обнаружения, повышение помехоустойчивости по отношению к определенным типам интерферирующих сигналов, свойства которых отличаются от свойств кодированных сигналов, также имеется возможность оценки параметров сигналов, несущих информацию о дальности, скорости объектов.

**Ключевые слова:** Классификация морских объектов; просветная система мониторинга, обработка сигналов, эхо-сигналы объектов, метод активной корреляции.

## A METHOD TO CLASSIFY UNDERWATER TECHNICAL OBJECTS BY USING AN EXPERT INTELLIGENT SYSTEM WITH RECEIVING PARAMETRIC ANTENNA

**Anna M. Vasilenko**

Cand. Tech. Sci.  
Researcher of a Research Laboratory  
The Pacific Higher Naval College named after Admiral Makarov  
Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia  
e-mail: pva.877com@mail.ru

**Valeriy A. Pyatakovich**

Associate Professor Cand. Tech. Sci., Professor of the Academy of Military Sciences,  
Chief of the Research Laboratory, The Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov  
Kamskiy lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia  
e-mail: pva.877com@mail.ru

**Victoria F. Rychova**

Chief of the Department of Research and Innovation Activities  
Maritime state university named Admiral Nevelskoi  
Verkhneportovaya, 50 – a, Vladivostok, 690059, Russia  
e-mail: rychkova@msun.ru



**Abstract**

The article presents the functional scheme of the device for measuring range. The ability to vary and select the signal characteristics is an important factor in the development of modern sonar systems using sophisticated signal processing techniques. The considered regularities of correlation signal processing can be implemented in the media low-frequency signal scanning systems when receiving phase difference signals in multichannel mode. Meanwhile signals of the formation and projection path transmitted over radio channel can be used in the reception and processing path as reference signals. A higher resolution with respect to the detection range and an increase in noise immunity with respect to certain types of interfering signals whose properties differ from the properties of the coded signals are thereupon achieved and it is also possible to estimate the parameters of signals carrying information about the range and speed of objects.

**Keywords.** Classification of sea objects; low-frequency monitoring system, signal processing, echo-signals of objects, active correlation method.

**Введение**

Обоснование практических путей реализации методов активной корреляции в просветных системах мониторинга будем проводить на основе разработок существующих методов импульсных гидролокаторов. В импульсных гидролокационных системах параметры зондирующего импульса обычно представляют собой компромисс между желанием получить лучшее разрешение по дальности, что связано с необходимостью иметь, возможно, меньшую длительность импульса, и стремлением добиться максимально возможной дальности обнаружения, что требует максимизации энергии импульса за счет использования как можно более длинных импульсов.

В работе Вудворта установлено, что форма сигнала является дополнительным параметром при разработке гидролокатора и что такие характеристики как дальность и разрешение по дальности могут определяться не только средней излучаемой мощностью и длительностью излучаемого импульса, но и формой сигнала. Идеи, развитые Вудвортом, означают, что длительность излучаемого импульса может быть такой, какая необходима для удовлетворения энергетических требований. После удовлетворения требований к характеристикам обнаружения можно обеспечить условия для получения необходимого разрешения по дальности за счет кодирования излучаемого сигнала путем широкополосной модуляции.

**1. Результаты исследования и их обсуждение**

Для извлечения полезной информации, содержащейся в сигнале, требуется использовать более сложные методы обработки по сравнению с методами для простого импульсного сигнала. Они известны как методы согласованной фильтрации, методы корреляционной обработки. Обработка сигналов реализуется путем корреляционного сравнения принимаемого сигнала с копией зондирующего сигнала, имеющейся в приемнике. При этом предполагается, что копия представляет собой зондирующий сигнал,

форма которого изменена в зависимости от возможной задержки и (или) доплеровской частоты. Поэтому в приемнике должен иметься банк различных копий. Это значительно увеличивает как сложность алгоритмов обработки сигналов, так и самого приемного устройства. Для расширения полосы частот используются частотные или фазомодулированные сигналы.

Рассмотрим применение сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) для измерения дальности до малоподвижных объектов методом активной корреляционной обработки. Техника такой обработки состоит из следующих процедур: принятый сигнал дискретизируется, смешивается с референтным, фильтруется низкочастотным фильтром, и, наконец, полученный дискретный сигнал пропускается через гребенку узкополосных фильтров. Гребенка узкополосных фильтров необходима для извлечения тонов, которые пропорциональны дальности до морского технического объекта (МО). Такая обработка эффективно преобразовывает временную задержку, соответствующую дальности, в частоту. Все принятые сигналы с одной и той же дальности будут иметь одинаковую постоянную частоту.

**2. Функциональная схема устройства измерения дальности**

На рисунке 1 представлена функциональная схема устройства измерения дальности методом активной корреляции. Схема устройства включает следующие взаимосвязанные блоки: ГС.1 – генератор зондирующего сигнала формирует сигнал в дискретном виде; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь преобразует цифровой сигнал в аналоговый; ПФ.1 – полосовой фильтр удаляет помехи и выделяет аналоговый сигнал в заданной полосе; Ус.1 – усилитель сигнала перед подачей его на излучатель; Ус.2 – усилитель принятого эхо-сигнала; ПФ.2 – полосовой фильтр выделяет эхо-сигнал в заданной полосе; АЦП – аналого-цифровой преобразователь проводит дискретизацию аналогового сигнала; СМ – смеситель осуществляет перемножение референтного сигнала и эхо-сигнала; НФ – низкочастотный

фильтр выделяет низкочастотную составляющую разностной частоты, которая содержит информацию о дальности; СПМ – блок вычисления спектральной плотности мощности, ось частот является шкалой

дальности и градуируется в единицах длины; УУ – устройство управления для синхронизации работы отдельных блоков; ПК – персональный компьютер функции блоков, охваченных пунктирной линией.

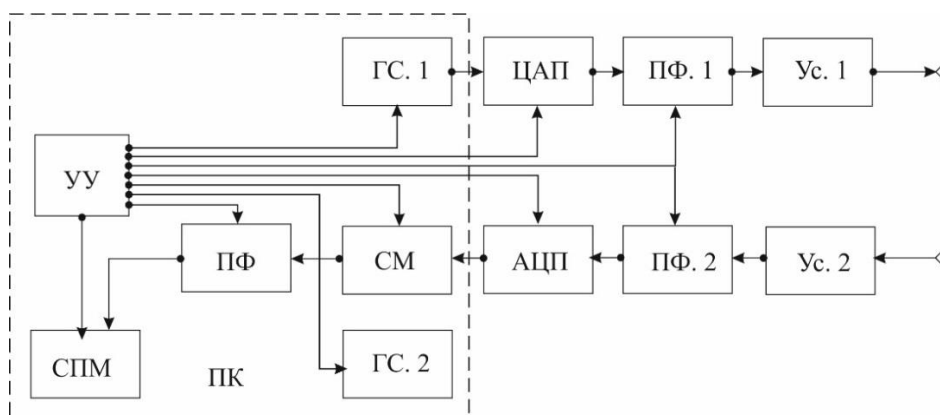


Рис. 1. Функциональная схема устройства измерения дальности

Генератор зондирующего сигнала (ГС.1) по команде из устройства управления формирует в цифровом виде ЛЧМ сигнал с заданными параметрами (начальная частота, полоса частот, длительность). Цифро-аналоговый преобразователь преобразует сигнал из цифровой формы в аналоговую форму и подает его в полосовой фильтр (ПФ.1). Так как в результате преобразования «цифра-аналог» появляются помехи, то ПФ.1 выделяет сформированный аналоговый сигнал в заданной полосе частот, после чего сформированный зондирующий ЛЧМ сигнал усиливается в усилителе и излучается. В это же время по команде УУ запускается генератор референтного ЛЧМ сигнала, который имеет такие же начальную частоту и коэффициент девиации что и зондирующий сигнал, но отличающийся длительностью и полосой частот, которые определяются по заданному диапазону дальности.

Принятый эхо-сигнал усиливается усилителем (Ус.2) и подается в полосовой фильтр (ПФ.2), где сигнал отфильтровывается в заданной полосе от шума среды. Далее сигнал подается в аналого-цифровой преобразователь, где он приводится к цифровому виду, и затем поступает в смеситель. В смесителе эхо-сигнал перемножается с референтным, который подается из ГС.2. В результате образуются две составляющие сигнала. Одна составляющая разностной частоты, которая используется для измерения дальности, и другая высокочастотная составляющая суммарной частоты. Низкочастотный фильтр, куда сигнал подается с выхода смесителя, выделяет низкочастотную разностную составляющую и подавляет высокочастотную составляющую. Далее низкочастотная составляющая подается в блок

вычисления спектральной плотности мощности. Операция вычисления спектральной плотности мощности реализуется на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье, когда вычисляется дискретное преобразование Фурье и затем вычисляется его квадрат модуля. При этом частотная ось градуируется в единицах измерения дальности. Синхронизация работы отдельных блоков устройства осуществляется устройством управления.

Рассмотрим более подробно принцип работы приемника с активной корреляционной обработкой, когда принимаются эхо-сигналы от нескольких морских технических объектов при условии, что сигналы перекрываются во времени. Нормализованный излученный сигнал может быть представлен следующим выражением [1, 2, 5]

$$S(t) = \cos[2\pi(f_0 t + 0,5\mu t^2)], \quad 0 \leq t \leq \tau,$$

где  $f_0$  – начальная частота;  $\mu = B/\tau$  – коэффициент девиации частоты;  $B$  – полоса частот;  $\tau$  – длительность сигнала.

Предполагаем, что «точный» рассеиватель находится на расстоянии  $R$ , тогда отраженный сигнал в приемнике будет иметь вид:

$$S(t) = a \cdot \cos[2\pi(f_0(t - \Delta\tau) + 0,5\mu(t - \Delta\tau)^2)],$$

где  $a$  – коэффициент, учитывающий отражающую способность МО, усиление антенны и потери на распространение.

Временная задержка  $\Delta\tau$  определяется соотношением:

$$\Delta\tau = 2R/c,$$

где  $c$  – скорость распространения сигнала в морской среде.

Референтный сигнал имеет такую же форму, как и излученный:

$$S_r(t) = 2 \cos[2\pi(f_r t + 0,5\mu t^2)], \quad 0 \leq t \leq T_r,$$

где  $f_r$  – начальная частота;  $T_r$  – длительность референтного сигнала.

Референтный сигнал существует в приемном окне, длительность которого вычисляется по формуле:

$$T_r = 2(R_{max} - R_{min})/c = 2R_r/c,$$

где  $R_{max}$  – максимальная измеряемая дальность;  $R_{min}$  – минимальная измеряемая дальность;  $R_r$  – диапазон дальности, соответствующий окну приема сигнала.

На выходе смесителя после смешивания эхо-сигнала с референтным будет сформирован сигнал следующего вида:

$$S_c(t) = S_r(t) * S(t) = a * \cos[2\pi((f_r - f_0)t + \mu\Delta\tau t + \varphi)] + a * \cos[2\pi(f_r + f_0)t + \mu(t - 0,5\Delta\tau)^2 + \varphi];$$

$$\varphi = (f_0 - 0,5\mu\Delta\tau)\Delta\tau$$

Предположив что  $f_r = f_0$  в выражении для  $S_c(t)$  получим следующую запись сигнала с выхода низкочастотного фильтра:

$$S_0(t) = a * \cos[2\pi(\mu\Delta\tau t + \varphi)].$$

Подставим в полученное выражение соотношения  $\Delta\tau = 2R/c$ ,  $\mu = B/\tau$ , и преобразуем его к виду:

$$S_0(t) = a * \cos\left[2\pi\left(\frac{B}{\tau} \frac{2R}{c} t + \varphi\right)\right]$$

Мгновенная частота такого сигнала равна:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left( 2\pi \left( \frac{B}{\tau} \frac{2R}{c} t + \varphi \right) \right) = \frac{2BR}{\tau c}.$$

Процедуры смешивания с референтным сигналом и низкочастотная фильтрация эквивалентны вычитанию мгновенной частоты эхо-сигнала из мгновенной частоты референтного сигнала. Поэтому выход низкочастотного фильтра состоит из одного или нескольких тонов (в случае нескольких разных дальностей), соответствующих дальностям до МО. Выражение для мгновенной частоты показывает, что дальность до МО пропорциональна мгновенной частоте, которая является неизменно-стабильной. Последующее вычисление спектральной плотности мощности приводят к выводу, что пик на некоторой частоте указывает на присутствие МО на дальности.

Предположим, что имеется  $M$  морских объектов, находящихся на дальностях  $R_1 \dots R_M$ . Считаем также, что  $R_1 < \dots < R_M$  и эхо-сигналы от этих МО перекрываются во времени. Исходя из принципа суперпозиции, общий сигнал можно определить выражением:

$$S(t) = \sum_{i=1}^M a_i \cos[2\pi(f_0(t - \Delta\tau_i) + 0,5\mu(t - \Delta\tau_i)^2)], \quad (1)$$

где  $a_i$  – коэффициенты, учитывающие отражающие способности МО, усиление антенны, потери на распространение.

Времена  $\Delta\tau_i = 2R_i/c$ ,  $i = 1 \dots M$ , представляют временные задержки,  $\Delta\tau_1$  совпадает с началом окна приема. Используя выражение (1), общий сигнал с выхода низкочастотного фильтра может быть представлен как:

$$S_0(t) = \sum_{i=1}^M a_i * \cos\left[2\pi\left(\frac{B}{\tau} \frac{2R_i}{c} t + \frac{2R_i}{c} \left(f_0 - \frac{B}{\tau} \frac{R_i}{c}\right)\right)\right].$$

Следовательно, наличие эхо-сигналов проявляется в появлении постоянных частотных тонов, которые могут выделяться гребенкой узкополосных фильтров. В цифровой обработке сигналов для обнаружения тональных сигналов широко применяется дискретное преобразование Фурье [2, 3, 5], которое реализуется на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье. По этой причине определение соответствующей частоты дискретизации и размеры БПФ критичны для изложенного метода. Так как метод активной корреляционной обработки целесообразно применять для ЛЧМ сигналов с значительной полосой частот, то приемное окно по этой причине имеет ограничения на размеры.

### 3. Результаты экспериментов

Проведем оценку отношения сигнал/шум на выходе рассмотренного приемника от которого зависит эффективность разрабатываемой авторами системы морского мониторинга с элементами искусственного интеллекта, оперативность операций обнаружения и распознавания, составляющих процесс классификации морского технического объекта. Считаем, что на входе присутствует стационарный «белый» шум с дисперсией  $\sigma^2 = N_0 B$ , где  $B$  – полоса частот;  $N_0$  – спектральная плотность мощности шума. Так как эхо-сигнал присутствует «редко», то при непрерывном наблюдении случайных флуктуаций шумового сигнала внимание концентрируется на кратковременных отклонениях от усредненного за длительный период или среднеквадратического значения шума. Поэтому отношение сигнал/шум, которое чаще всего используется при решении локационных задач, определяется как отношение мгновенной пиковой мощности выходного сигнала и выходной мощности шума [4]. Применим это определение для вышеизложенного способа.

Как известно, энергия принимаемого сигнала с «прямоугольной» огибающей равна

$$\mathcal{E} = 0,5a_0^2\tau$$

где  $a_0$  и  $\tau$  – амплитуда и длительность сигнала соответственно. Мощность стационарного «белого» шума на входе приемника имеет величину:

$$P_N = N_0 B; B = \Delta f \cdot N$$

Так как в нашем случае анализ проводится в элементарной полосе  $\Delta f$ , то выходная мощность шума определяется  $P_N/N$ . В результате, отношение сигнал/шум, согласно определению, имеет вид:

$$q = \frac{a^2}{P_N/N} = \frac{a^2 N}{P_N} = \frac{2\mathcal{E}}{\tau} \cdot \frac{N}{N_0 B}.$$

Так как выделенный гармонический сигнал находится в полосе  $\Delta f$ , то в соответствии с равенством Парсевала его энергия в области частот определяется соотношением:

$$\mathfrak{E} = \int_{f_0-0,5\Delta f}^{f_0+0,5\Delta f} |S(f)|^2 df,$$

где  $S(f) = \int_0^T S(t) \exp(-j2\pi ft) dt$  – преобразование Фурье выделенного тонального сигнала.

Известно, что ширина полосы гармонического сигнала обратно пропорциональна длительности сигнала. По этой причине, согласовывая интервал дискретизации по частоте  $\Delta f$  с длительностью сигнала, можем записать, что

$$\mathfrak{E} = \int_{f_0-0,5\Delta f}^{f_0+0,5\Delta f} |S(f)| df \approx |S(f_0)| \Delta f.$$

И тогда соотношение сигнал/шум сводится к выражению:

$$q \approx \frac{2}{\tau} \cdot \frac{\Delta f \cdot N |S(f_0)|}{N_0 B}.$$

Учитывая, что  $B = \Delta f \cdot N$  и  $\Delta f = 1/\tau$ , окончательно получим:

$$q \approx \frac{2|S(f_0)| \Delta f}{N_0} \approx \frac{2\mathfrak{E}}{N_0}, \tag{2}$$

Полученное соотношение сигнал/шум (2) полностью совпадает с известным соотношением сигнал/шум в случае согласованной фильтрации или корреляционной обработки. Вместе с тем, необходимо отметить, что в рассмотренном методе гидролокации, как обнаружение объекта, так и измерение дистанции до него проводятся в частотной области. Устойчивость структуры ЛЧМ сигналов к искажениям в гидроакустическом канале позволяет применять их и при решении задач навигационного ориентирования подводных аппаратов. Однако при наличии доплеровского эффекта данный метод будет давать ошибку по дальности.

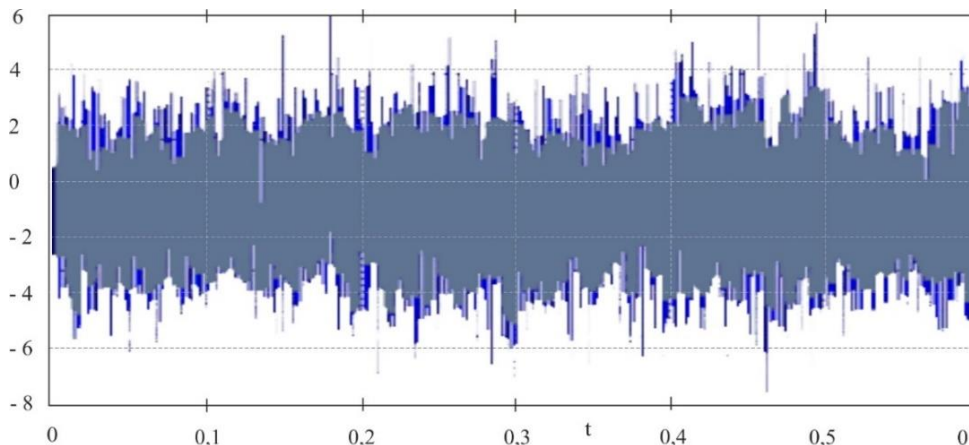


Рис. 2. Гидроакустический сигнал на входе смесителя

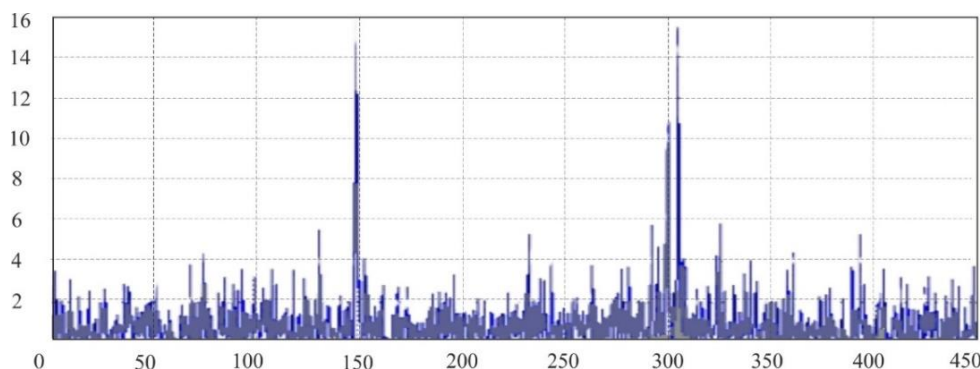


Рис. 3. Гидроакустический сигнал на выходе смесителя

На рис. 2 приведен пример сигнала, смоделированного при отношении сигнал/шум - 10 дБ. На рис. 3 проиллюстрирован результат обнаружения трех объектов, расположенных на дистанциях 150, 300 и 305 м, методом активной корреляции в условиях помех среды.

Рассмотренные закономерности

корреляционной обработки сигналов могут быть реализованы в просветных системах мониторинга [3, 5] при использовании многоканального режима приема сигналов разности фаз.

При этом в качестве опорных сигналов в тракте приема и обработки могут

использоваться сигналы тракта формирования и излучения, передаваемые по радиоканалу. Место объекта может быть так же определено на основе пространственной структуры акустического поля, сформированного в зоне характеристики направленности приемной антенны. Область местоположения объекта на озвучиваемой трассе определяется по углам прихода лучей на приемную антенну путем расчета обратной лучевой структуры просветного поля в протяженном гидроакустическом канале [5–7].

#### Заключение

В современных гидролокаторах для решения задач обнаружения сигналов и измерения их параметров, несущих информацию о дальности и скорости МО, используют различные виды сигналов и методы их обработки. При этом основным методом является метод согласованной фильтрации или корреляционный метод. Метод корреляционной обработки позволяет сжимать сигнал во времени, концентрируя энергию сигнала в узком диапазоне и увеличивая тем самым отношение сигнал/шум на выходе приемника, что ведет к повышению вероятности правильного обнаружения, улучшению разрешающей способности и точности измерений. Для успешного применения техники корреляционной обработки необходим банк копий сигналов, учитывающих влияние канала

распространения звука, что непросто сделать для сигналов со сложной фазовой модуляцией. В противном случае положительный эффект не достигается.

Сущность метода активной корреляционной обработки ЛЧМ сигнала заключается в преобразовании временного сдвига сигнала в частотный интервал. Для этого в приемнике формируется специальный референтный сигнал с параметрами, которые зависят от параметров зондирующего сигнала и от диапазона измеряемой дальности, что отличает этот метод от известных методов корреляционной обработки. Данный метод отличается от известных отсутствием банка копий, при этом он сохраняет все достоинства техники корреляционной обработки. Обнаружение гидроакустических сигналов и извлечение из них полезной информации определяет основы алгоритмизации обработки данных в экспертной интеллектуальной системе классификации морских целей. Метод активной корреляции кроме обнаружения сигналов, позволяет измерять дальность до морских объектов с высокой разрешающей способностью, что делает возможным применять его для решения задачи акустического мониторинга морской среды в разрабатываемой авторами экспертной интеллектуальной системе с приемной параметрической антенной.

#### Литература

1. Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов. – М.: Сов. радио, 1970.
2. Кремер И.Я. Пространственно-временная обработка сигналов. – М.: Радио и связь, 1984. –224 с.
3. Пятакович В.А., Василенко А.М., Хотинский О.В. Распознавание и классификация источников формирования полей различной физической природы в морской среде: монография. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2017. – 255 с.
4. Харкевич. Борьба с помехами. – М.: Радио и связь, 1983.
5. Пятакович В.А., Василенко А.М., Хотинский О.В. Нейросетевые технологии в интеллектуальных системах обнаружения и оперативной идентификации морских целей: монография. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2018. – 263 с.
6. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018612169 РФ. Программно-вычислительный комплекс имитационного моделирования морской информационной ситуации при идентификации целей / Василенко А.М., Пятакович В.А.; 2017.
7. Патент РФ № 2593624. Радиогидроакустическая система передачи информационных волн из морской среды в атмосферу и обратно / Мироненко М.В., Василенко А.М., Пятакович В.А.; 2016

#### References

1. Varakin L.E. Teoriya slozhnyh signalov [Complex signal theory]. Moscow, Sov. radio Publ., 1970.
2. Kremer I.Ya. Prostranstvenno-vremennaya obrabotka signalov [Space-time signal processing]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1984.
3. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Hotinskij O.V. Raspoznvanie i klassifikaciya istochnikov formirovaniya polej razlichnoj fizicheskoj prirody v morskoy srede [Recognition and classification of the sources of the formation of fields of different physical nature in the marine environment]. Vladivostok, Mor. gos. un-t Publ., 2017. 255 p.
4. Harkevich. Bor'ba s pomekhami [Interference control]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1983.
5. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Hotinskij O.V. Nejrosetevye tekhnologii v intellektual'nyh sistemah obnaruzheniya i operativnoj identifikacii morskikh celej [Neural network technologies in intelligent detection systems and operational identification of marine targets]. Vladivostok, Mor. gos. un-t Publ., 2018. 263 p.
6. Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A. Programmno-vychislitel'nyj kompleks imitacionnogo modelirovaniya morskoy informacionnoj situacii pri identifikacii celej [Software complex of simulation of the marine information situation in the identification of targetc]. Inventor's certificate RF No. 2018612169, 2017.
7. Mironenko M.V., Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A. Radiogidroakusticheskaya sistema peredachi informacionnyh voln iz morskoy sreedy v atmosferu i obratno [Radio-hydroacoustic system for transfer of information waves from the marine environment to the atmosphere and back]. Patent RF No2593624, 2016.

**УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

УДК 629.5.062.13

**УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ СУДОВ НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ В НОРМАЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ****Валерий Юрьевич Каминский**

кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией  
Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук  
199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13  
тел.: (812) 321-95-68, e-mail: Kaminskyv@yandex.ru

**Марин Любенов Маринов**

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник  
Институт проблем транспорта им. Н.С.Соломенко Российской академии наук  
199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13  
тел. (812) 321-95-68 e-mail: marinlomsky@gmail.com

**Дмитрий Алексеевич Скороходов**

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник  
Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук  
199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13  
тел. 8(812) 323-29-54, e-mail: info@iptran.ru  
профессор кафедры

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5,  
тел. +7(921) 884-17-16, e-mail: skorohodda@mail.ru

**Алексей Леонидович Стариченков**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, дом 5,  
тел. +7(921) 651-44-87, e-mail: alstar72@yandex.ru

**Аннотация**

Рассмотрены аварийные ситуации, характерные для собственно неустойчивых и собственно устойчивых судов на глубоко погруженных подводных крыльях, приводящие к потере управляемости: заклиниванию исполнительного органа, выходу из строя источников информации по крену, дифференту, скорости и высоте движения судна, самопроизвольному или по вине оператора уменьшению ходового дифферента до отрицательных значений.

Предложен метод косвенной оценки высоты движения судна, заключающийся в «замораживании» высоты, фиксирующий положение исполнительных органов, соответствующее посадке судна в момент аварии вне зависимости от действия внешних возмущающих воздействий. При выходе из строя датчика скорости хода предлагается вводить в систему управления постоянное значение скорости, достигнутой к моменту наступления аварии. Предлагается также косвенная оценка скорости хода по результатам измерения частоты вращения турбины. Подобные решения позволяют удерживать судно в крыльевом режиме и исключить аварийную ситуацию.

Обоснована безопасность функционирования собственно устойчивого судна на подводных крыльях путем исключения из системы управления носовых закрылков. При этом сокращается объем автоматизации (из состава системы управления движением удаляются каналы управления носовыми закрылками), сокращается вдвое количество гидроприводов и гидравлического оборудования, перераспределяется весовая нагрузка судна в сторону увеличения запасов топлива, упрощается конструкция, повышается надежность носового крыльевого комплекса, снижается стоимость постройки и эксплуатации судна.

**Ключевые слова:** аварийная ситуация, датчик, заклинивание, закрылки, исполнительный орган, крыльевой комплекс, курсовой угол, оператор, скорость хода, стабилизация.



## MOTION CONTROL OF HYDROFOIL VESSELS IN NORMAL AND EMERGENCY SITUATIONS

### Valery Yu. Kaminsky

Candidate of Engineering Sciences, Docent, Head of the Laboratory  
Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences  
199178, Saint-Petersburg, Vasilevsky Ostrov, 12 line, h.13  
phone.: (812) 321-95-68, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

### Marin L. Marinov

Candidate of Engineering Sciences, leading researcher  
Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences  
199178, Saint-Petersburg, Vasilevsky Ostrov, 12 line, h.13  
phone.: (812) 321-95-68, e-mail: marinlomsky@gmail.com

### Dmitriy A. Skorokhodov

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Chief Researcher Officer  
Institute of Transport Problems after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences  
199178, Saint-Petersburg, Vasilevsky Ostrov, 12 line, h.13

Professor of Department

Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5

Professor Popov street, Saint-Petersburg,

197376, phone: +7(921) 884-17-16, e-mail: skorohodda@mail.ru

### Alexey L. Starichenkov

doctor of Engineering Sciences, associate Professor, head of the Department

Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5

Professor Popov street, Saint-Petersburg,

197376, phone: + 7 (921) 651-44-87, e-mail: alstar72@yandex.ru

### Abstract

The article deals with emergency situations, typical for the unstable and stable vessels on deep submerged hydrofoils, which lead to the loss of controllability: jamming of the Executive body, failure of sources of information on the roll, trim, speed and altitude of the vessel, spontaneous or due to the fault of the operator reduction of the running trim to negative values.

The method of indirect estimation of the vessel motion height consisting in "freezing" of the altitude, fixing the position of Executive bodies, corresponding to the vessel landing at the time of the accident, regardless of the action of external disturbances, is proposed. In case of failure of the speed sensor, it is proposed to enter into the control system a constant value of the speed achieved by the time of the accident. An indirect estimate of the travel speed is also proposed based on the results of turbine speed measurements. Such decisions allow to keep the vessel in a wing mode of movement and to exclude an emergency.

It justifies the security operation is actually sustainable hydrofoils by eliminating from the system control nasal flaps. At the same time, the volume of automation is reduced (from the composition of the motion control system, the nose flaps control channels are removed), the number of hydraulic drives and hydraulic equipment is halved, the weight load of the vessel is redistributed towards increasing fuel reserves, the design is simplified and the reliability of the bow wing complex is increased, the cost of construction and operation of the vessel is reduced.

**Key words:** emergency, sensor, flaps, executive wing of the complex, heading angle, operator, speed, stabilization.

### Введение

Судно на подводных крыльях (СПК) относится к типу скоростных судов с динамическим принципом поддержания. Построенные и введенные в эксплуатацию СПК имеют водоизмещение до 500 т. В России и США спроектированы СПК водоизмещением до 2000 т. Скорость хода СПК на тихой воде достигает 60 узлов. Крейсерская скорость на волнении 5 баллов (высота волны  $h=3$  м 3%-ой обеспеченности) составляет 50 узлов [1-3].

Существуют следующие типы СПК [4-7]:

- СПК с малопогруженными крыльевыми комплексами (МКК) без управляемых исполнительных органов, и с управляемыми исполнительными органами (МККУ) (чаще всего закрылки устанавливаются на носовом крыльевом комплексе);

- СПК с глубокопогруженным крыльевым комплексом (ГПКК), которые в свою очередь включают собственно неустойчивые СПК и суда собственно устойчивые, с пересекающими элементами на носовом крыльевом комплексе (ГПККП).

Движение СПК характеризуются тремя режимами: обычный режим (водоизмещающий),

переходный и крыльевой (движение на подводных крыльях).

Водоизмещающий режим не представляет интереса с точки зрения функционирования системы управления движением (СУД) судна. Водоизмещающий режим реализуется при малых скоростях хода - до 10 узлов. Данный режим (вспомогательный) характеризуется ограниченной эффективностью исполнительных органов. Эффективность сохраняет лишь руль направления, максимальный угол отклонения которого возрастает до 30 град по сравнению с движением на крыльях (10-15 град). Движение в этом режиме может выполняться главными двигателями полного хода, однако реализуется редко, т.к. является неэкономичным. Как правило, режим осуществляется двигателями малого хода с использованием винтодвижительных рулевых колонок. Судно сохраняет устойчивость на курсе ввиду наличия под водой мощных крыльевых комплексов. На некоторых судах закрылки носовых и крыльевых комплексов используются для умерения бортовой качки.

Опыт эксплуатации систем управления движением на самоходных моделях и действующих судах показал, что снижение уровня безопасности, качества стабилизации и управляемости СПК вызывается следующими основными причинами [8]: заклиниванием или потерей исполнительных органов (ИО); отказом источников информации; неисправностями в каналах СУД; отказом электрического и гидравлического питания.

Режим движения судна становится не безопасным в результате появления неблагоприятного сочетания параметров движения, приводящих к возникновению неустойчивого режима. Большинство аварийных ситуаций развивается стремительно, поэтому система управления движением должна своевременно их обнаружить и скорректировать режим движения судна или его положение.

Выполним классификацию неисправностей по степени их влияния на безопасность судна на подводных крыльях [9]: неисправности, создающие угрозу безопасности СПК (аварийный режим); неисправности, приводящие к потере управляемости (предаварийный режим); неисправности, приводящие к незначительному ухудшению основных характеристик (снижение эффективности функционирования СПК или деградация качества управления параметрами движения СПК).

Для рационального выбора структуры и параметров СУД рассмотрим динамические характеристики СПК различных типов, а также их типовые неисправности, определим возможные средства предотвращения аварийных ситуаций.

### 1. Набор скорости

Разгон СПК до скорости 30-40 узлов реализует переход из водоизмещающего режима

движения в крыльевой. Данный переходный режим характеризуется большими возмущающими воздействиями со стороны водной поверхности, вызывающими неустойчивость положения судна, т.к. вследствие малой скорости движения эффективность исполнительных органов недостаточна для компенсации внешних возмущений. Разгон требует оптимального сочетания необходимого времени и энергетических затрат при соблюдении безопасности движения. Испытания показали, что оптимальным является разгон при изменении дифферента в соответствии с кривой сопротивления. Для собственно устойчивых СПК этот режим может быть осуществлен при ручном управлении, т.е. оператором с пульта управления в ходовой рубке при наличии информации о положении исполнительных органов и дифференте судна. Собственно неустойчивые СПК могут выходить на крыло только в автоматическом режиме управления дифферентом и высотой, в зависимости от скорости хода, при одновременной работе закрылков по стабилизации крена и дифферента. В переходном режиме выхода на крылья вследствие действия нестационарных гидродинамических сил происходит перераспределение давлений на корпусе, в результате чего у судна существенно снижается собственная остойчивость [10].

Проблему выбора оптимальной траектории можно решить, сокращая время нахождения судна на малоустойчивом участке траектории с помощью СУД. Для этого, при выходе на подводные крылья, вертикальное перемещение центра масс судна целесообразно начинать с момента, когда величина полученной гидродинамической силы будет больше веса судна. Оптимальная траектория выхода СПК состоит из участка разгона в горизонтальной плоскости и вертикального перемещения центра масс судна. Зависимости высоты движения от скорости  $h(V)$  соответствует режим движения судна на участке от  $V_0$  до  $V'$  с набором скорости при  $h = 0$  (где:  $V_0$  - скорость при водоизмещающем положении судна,  $V'$  - скорость, соответствующая «горбу» сопротивления на графике зависимости сопротивления воды движению судна от скорости). Достигнув скорости  $V'$ , судно проходит участок вертикального перемещения до полного выхода корпуса из воды  $h_k$ . Вид траектории в этом случае определяется конфигурацией корпуса судна и эффективностью исполнительных органов СУД. На этом участке система создает максимальное управляющее воздействие, направленное на увеличение высоты подъема корпуса судна. По мере подъема скорость возрастает от  $V'$  до  $V''$  (движение на крыльях).

Вследствие низкой эффективности исполнительных органов при малых скоростях движения непосредственное управление высотой подъема СПК затруднено. Рекомендуется осуществлять косвенное управление - за счет корпуса, изменением углового положения относительно набегающего потока. В этом случае достигается необходимая величина подъемной гидродинамической силы, перемещающей судно в вертикальной плоскости.

Помимо управления траекторией движения СУД должна стабилизировать положение судна. Для СПК, оборудованного исполнительными органами, предназначенными для одновременного управления положением судна и его стабилизации, в отдельные моменты требуются значительные управляющие воздействия, которые ограничивают угол отклонения регулирующих органов при стабилизации судна и не дают требуемого эффекта умерения качки.

Для уменьшения времени выхода на крыльевой режим коэффициенты передачи системы управления должны выбираться в зависимости от располагаемой эффективности исполнительных органов и заданной мореходности.

При программном автоматическом управлении схема системы управления усложняется введением программатора. Подобное управление используется при выполнении многократно повторяющихся операций, реализация которых затруднена или утомительна для оператора. Примером использования подобного управления служат программы выхода на крыло СПК с глубокопогруженным крыльевым корпусом. В соответствии с заданными алгоритмами изменения программной высоты и дифферента, обеспечивается перекладка исполнительных органов для выхода судна в крыльевой режим движения [11].

$$h_{kp} = h - \frac{h_1 - h_2}{V_2 - V_1} \cdot (V - V_1); \quad (1)$$

$$\psi_{kp} = \psi - \frac{\psi_1 - \psi_2}{V_{max} - V} \cdot (V - V_3), \quad (2)$$

где:  $h_1$  - начальная глубина погружения крыла,  $h_2$  - заданная глубина погружения,  $h_{kp}$  - высота движения судна в крыльевом режиме,  $h$  - текущая глубина погружения крыльевого корпуса,  $\psi_1$  - начальный угол дифферента,  $\psi_2$  - заданный угол дифферента,  $\psi$  - текущий угол дифферента,  $V$  - текущая скорость хода,  $V_1, V_2, V_3$  - уставки по скорости хода судна.

Программное изменение заданного значения глубины погружения крыла и дифферента в

зависимости от скорости хода позволяет максимально быстро перевести судно в основной режим движения.

## 2. Движение СПК в крыльевом режиме и посадка в водоизмещающее положение

Режим характеризуется движением на крыльях при полном отрыве корпуса судна от воды. Для современных морских СПК клиренс (клиренс – расстояние от корпуса судна до среднего уровня взволнованной поверхности воды) может достигать 2-2,5 м. Данный режим движения является основным для СПК и реализуется при скорости свыше 30-40 узлов в зависимости от типа СПК. Для собственно неустойчивых СПК движение в этом режиме возможно только при наличии системы пространственной стабилизации по крену, дифференту и высоте центра тяжести. Их движение отличается малой потерей скорости при ходе на спецификационном волнении (5 баллов) на всех курсовых углах встречи (КУВ) судна с направлением распространения волн и небольшими вертикальными перегрузками. Собственно устойчивые СПК с ГПККП в этом режиме испытывают значительную потерю скорости, достигающую 20% по сравнению с ходом судна на тихой воде, и большие вертикальные перегрузки, особенно при движении с КУВ=0° или 180°.

Наличие автоматически управляемых исполнительных органов позволяет СПК уменьшать координированный разворот, уменьшающий радиус циркуляции и время, потребное для выхода на другой курс. Однако, как показали испытания и исследования пространственного движения отечественных СПК [12], для судов с ГПКК и ГПККП подобный разворот не приводит к увеличению угловой скорости циркуляции, а, напротив, ведет к ее снижению или даже к невозможности осуществить разворот, как например на СПК с ГПККП. В ходе испытаний выявлено, что плоский разворот или разворот с креном на борт, противоположный стороне циркуляции, предпочтительнее. Результаты испытаний и математического моделирования движения СПК позволили определить область параметров посадки судна, позволяющей осуществить координированный разворот с увеличением угловой скорости циркуляции.

Посадка (торможение) СПК является переходным режимом движения из крыльевого в водоизмещающий. Для собственно неустойчивых СПК с ГПКК требуется программное управление исполнительными органами и режимом работы главной энергетической установки. Режим торможения характеризует такую важную техническую и эксплуатационную характеристику судна как маневренность. «Тормозной путь» - расстояние, проходимое судном до полной остановки с момента начала торможения, является маневренной характеристикой,

непосредственно влияющей на выбор безопасной скорости движения. Улучшение этой характеристики позволяет не только повысить безопасность эксплуатации судна, но и, в конечном счете, существенно увеличить эффективность его функционирования.

Для современных СПК, эксплуатационная скорость которых существенно возросла, задача повышения эффективности торможения приобретает особую актуальность. При движении в стесненных условиях быстрое торможение является, нередко, единственным способом предотвращения аварии. Ввиду отсутствия реверса почти у всех СПК, единственным способом уменьшения тормозного пути, помимо быстрого снижения частоты вращения главных двигателей, является искусственное увеличение лобового сопротивления судна всеми доступными средствами, исключающими возрастание опасности движения. Для этого при торможении судна целесообразно использовать возможности исполнительных органов управления, что исключает необходимость установки специальных конструкций (щитов и пр.) для обеспечения быстрого торможения.

Эффективность торможения судна с автоматически управляемыми подводными крыльями может быть повышена за счет использования его исполнительных органов в направлении уменьшения подъемной силы на предельные углы, ограниченные необходимостью сохранения стабилизации аварийно опасных параметров движения (крена, дифферента). При этом тормозной путь существенно сокращается за счет следующих факторов:

- повышение лобового сопротивления крыльев вследствие перекадки исполнительных органов из среднего (балансирующего) положения на предельные углы;
- судно переводится из крыльевого положения в водоизмещающее в результате уменьшения подъемной силы; вход корпуса в воду увеличивает лобовое сопротивление судна.

Описанный способ легко реализуется подключением блока экстренного торможения к входам блоков формирования сигналов управления подъемной силой. Подобная схема используется в системе автоматического управления подводными крыльями отечественного СПК с ГПКК. Проверка эффективности схемы, выполненная во время ходовых испытаний, показала, что перекадка исполнительных органов управления подъемной силой позволяет при посадке судна от максимальной скорости 45 узлов до скорости малого газа 7 узлов сократить тормозной путь с 27 до 7,5 длин его корпуса. При этом время торможения судна снижается с 50 до 22 с.

### 3. Особенности динамических характеристик СПК

Рассмотрим характеристики функционирования собственно устойчивого СПК с ГПККП.

Как показали испытания, при отклонении носовых и кормовых закрылков в противофазе их результирующее воздействие на дифферент несколько выше, чем при отклонении только кормовых закрылков, однако, в этом случае возникает дополнительная раскачка корабля по высоте. Это явление необходимо учитывать при выборе алгоритма стабилизации дифферента. Несбалансированная перекадка носовых закрылков приводит, помимо крена, к раскачке по высоте и курсу, чего не наблюдается при аналогичной перекадке кормовых закрылков. Вертикальные перегрузки в центре тяжести увеличиваются с ростом частоты встречи корабля с волной и достигают максимальных значений (0,5 - 1,0)g на встречном волнении при частоте  $f > 0,8$ Гц, что отрицательно сказывается на обитаемости персонала и прочности крыльевых комплексов. При отключенных каналах управления закрылками все основные параметры движения становятся недопустимыми, а на курсовых углах встречи  $\sim 135^\circ$  судно не может устойчиво двигаться в крыльевом режиме.

Управление скоростью хода СПК с ГПККП с помощью системы автоматического управления обеспечило поддержание заданного значения скорости с погрешностью  $\pm 1$  узел. Время выхода на крыло с режима холостого хода составило 130 с., а полное время торможения судна со скорости  $V = 53,6$  узла достигло 70 с. Для СПК с ГПККП можно отказаться от носовых закрылков, что существенно упрощает и удешевляет структуру СУД при этом обеспечивая требуемое качество стабилизации. При этом уменьшаются потери скорости хода за счет исключения дополнительного сопротивления, создаваемого перекадкой носовых закрылков.

Для СПК с малопогруженным крыльевым комплексом характерны следующие особенности движения. При циркуляции с застопоренными закрылками и отклонении руля направления на величину  $\delta_{RH} = 10^\circ$ , судно движется с наружным креном  $\theta = 5^\circ$ . Падение скорости хода составляет  $\Delta V = 1,8$ м/с (10,2%  $V_{ном}$ ). Угловая скорость циркуляции составляет  $\omega = 1,77$  град/с. Осуществление координированного разворота при определенной посадке судна позволяет повысить скорость циркуляции до  $\omega = 2,4$  град/с. Однако, для создания внутреннего крена требуется перекадка закрылков на значительные углы (носовые левые и правые закрылки  $\delta_{нл} = \delta_{нпр} = 8^\circ$ ), что вызывает дополнительное сопротивление и приводит к снижению скорости хода с 17,5 м/с до 13,5 м/с, что на 22% ниже первоначальной скорости хода судна. Испытания СПК с МКК и СУД проводились на волнении 3 балла. Как показали испытания, использование системы управления движением даже для СПК с одним носовым малопогруженным крылом эффективно не только для умерения качки, но и, что более важно, позволяет увеличить скорость хода при одних и тех же внешних условиях испытаний.

СПК с ГПКК, обладая эффективными исполнительными органами, обеспечивают более высокое качество стабилизации судна. Кроме того, при росте волнения подобные СПК теряют меньше скорости в сравнении с СПК с ГПККП. Отметим, что использование исполнительных органов в водоизмещающем положении для умерения качки СПК с ГПКК достаточно эффективно регулирует крен судна.

Курсовой угол встречи ( $\chi$ ) существенно влияет на качество стабилизации судна в пространстве. СУД с выбранными заранее алгоритмами и коэффициентами, рассчитанными для определенных внешних возмущений и состояния СПК, не может обеспечить постоянства качества управления в реальных условиях работы на всех КУВ. Необходимо использование методов адаптации, применение которых обеспечивается современным уровнем аппаратурной реализации СУД. Задача адаптации возникает также при оптимизации режима работы газотурбинной установки (ГТУ) СПК [13]. Работа ГТУ при определенной мощности газогенератора зависит от следующих факторов: сопротивления движению корабля ( $R$ ), являющегося функцией водоизмещения ( $D$ ), состояния крыльевого комплекса ( $\xi$ ), состояния моря ( $h_{3\%}$ ), КУВ ( $\chi$ ) и температуры наружного воздуха ( $t_{не}$ ). Для определения текущего значения мощности газогенератора ( $N_{гг}$ ) температура наружного воздуха и водоизмещение могут быть измерены с большой точностью. Измерить характеристики  $h_{3\%}$ ,  $\chi$ ,  $\xi$  затруднительно либо невозможно, что исключает применение программного изменения посадки корабля с целью оптимизации работы газотурбинной установки. Проблема может быть решена отысканием экстремума функции  $N_e = f(n_{гг}, N_{гг})$  ( $N_e$  - эффективная мощность турбины вала;  $n_{гг}$  - частота вращения гребного вала), что исключает необходимость измерения указанных характеристик (кроме  $t_{не}$ ). Измеряя крутизну зависимости  $N_e = f(n_{гг})$  для установившихся значений  $N_{гг}$ ,  $n_{гг}$ , особенностью которой является отсутствие отрицательных значений производной  $dN_e/dn_{гг}$ , устанавливается потребность в регулировании при заданных установившихся значениях характеристик. При этом адаптируется не алгоритм управления газотурбинным двигателем, а алгоритм управления носовыми и кормовыми закрылками СУД:

$$\sigma_3 = K^h(p) (h_3 - h_u) + K^\psi(p) (\psi_3 - \psi_u); (3)$$

$$h_3; h_u = f(\chi, h_{3\%}, D, \lambda, t_{не}), (4)$$

где  $h_3$ ,  $h_u$  - заданная и истинная высота движения судна;

$\psi_3$ ,  $\psi_u$  - заданный и истинный дифферент судна,

$K^v(p)$ ,  $K^h(p)$  - операторы.

Решение задачи позволяет осуществить выбор посадки СПК, обеспечивающую максимальный КПД газотурбинного двигателя при

условии  $dN_e/dn_{гг}=0$ . При этом оператором реализуются следующие функции: оценка величины внешних возмущений, КУВ, анализ качества управления, определение оптимальных коэффициентов управления и их изменение. Достоинством подобной схемы является высокое качество управления во всем диапазоне изменения внешних ветроволновых воздействий и характеристик СПК. Однако в этом случае усложняется схема канала управления, поскольку адаптер является многофункциональным элементом с алгоритмами обработки информации значительно более сложными, чем алгоритмы каналов автоматического управления.

Проблема качества функционирования систем управления проявилась при испытаниях и эксплуатации СУД СПК. Выбор алгоритма управления и соответствующих коэффициентов передачи проводится, как правило, исходя из максимальных внешних ветроволновых воздействий. Подобная практика приводит к тому, что при внешних возмущениях, не соответствующих максимальным, например, для СПК с ГПКК < 4 баллов, возникает «тряска» судна вследствие работы системы управления движением, которая приводит к быстрой утомляемости личного состава, затрудняет управление техническими средствами и вызывает дополнительное падение скорости хода. Анализ инструкций по использованию СПК и обитаемости персонала показал, что требования к качеству стабилизации могут быть снижены. Однако при этом должны быть сформулированы новые требования, выполнение которых позволило бы СУД обеспечить удовлетворительную обитаемость персонала при движении судна во всем диапазоне внешних ветроволновых возмущений. Примером является СУД для СПК с ГПКК, когда стремление к высокому качеству стабилизации за счет усложнения алгоритма управления привело к отрицательным результатам по качеству управления судном, вызвало перегрузки носового крыльевого комплекса, затруднило управление техническими средствами и радиоэлектронным оборудованием.

Для повышения качества стабилизации движения судна разработана схема формирования алгоритмов управления, характеризующаяся следующими основными особенностями:

- наличие астатизма второго порядка в каналах крена, дифферента и высоты, который обеспечивается в каналах управления с помощью двух интегрирующих звеньев;

- формирование угловых скоростей движения судна по крену и дифференту с помощью разнесенных вертикальных акселерометров по бортам судна, в носу и в корме.

Мореходные испытания СПК с ГПК [14] при высоте волны 3%-ой обеспеченности  $h_{3\%} = 2,95 \div 3,00$  м показали, что периодически возбуждаются автоколебания носовых крыльев с выходом на насыщение по скорости и углу перекадки, в

результате которых развивается недопустимый крен, приводящий к переводу судна в водоизмещающее положение. Практически непрерывно возникали колебания кормовых закрылков с частотой  $f = 9$  Гц и амплитудой  $\delta = 3 - 4$  град. Кроме того, наблюдались длиннопериодические колебания по курсу с амплитудой  $\Delta\varphi = 2,5$  град и периодом  $T = 40$  сек. Частота колебаний судна по высоте превышала частоту встречи его с волной. При движении СПК с ГПКК на КУВ =  $180^\circ$  снижалась скорость хода с периодом  $T = 35 \div 40$  с. Колебания судна по глубине погружения носового крыльевого комплекса (НKK) при этом составляли от 2,5 м до 4,5 - 5,0 м, т.е. почти до водоизмещающего положения, а скорость снижалась до 8-12 узлов. Вариации коэффициентов усиления в каналах управления не дали положительных результатов. Кроме того, результаты испытаний показали, что начиная с волнения 4 балла и выше напряжения на носовом крыльевом устройстве, достигали величин 5300-5800 кг/см<sup>2</sup> и превышали расчетные на 45%.

Как показал анализ осциллограмм, СУД предопределила возникновение чрезмерных напряжений из-за наличия автоколебаний судна по высоте и крену. Причинами этого явления явились наличие астатизма второго порядка в каналах управления, колебательность контуров акселерометров и использование вертикальных акселерометров для получения сигналов по скорости изменения углов крена и дифферента. Кроме того, проверка качества выходного сигнала акселерометра в канале крена показала наличие паразитных сигналов, соизмеримых по величине с сигналом управления.

Исключение астатизма второго порядка и использование датчиков угловых скоростей для формирования сигналов коррекции позволило обеспечить устойчивое движение СПК в крыльевом режиме и высокое качество стабилизации на всех курсовых углах. Колебания скорости при этом составили  $\pm 2$  узла, т.е. уменьшились в среднем в 4-6 раз при полном отсутствии провалов по высоте. Снизились частота ( $f = 0,9$  гц) и угол перекладки носовых крыльев. В результате было обеспечено не только высокое качество стабилизации, но и щадящий режим работы исполнительных органов. При этом резко снизились напряжения на носовом крыльевом комплексе.

#### 4. Обеспечение безопасности движения собственно неустойчивых СПК с ГПКК

Испытания судов подобного типа подтвердили возможность их движения в крыльевом режиме на тихой воде и волнении моря до 5 баллов только при включенной системе управления движением, обеспечивающей стабилизацию судна по крену, дифференту и, высоте центра тяжести. При этом судно на скорости хода 50 узлов движется со средней глубиной погружения

НKK 3,5 – 4,0 м и с дифферентом 2,5 – 3,0° на корму.

В период испытаний и опытной эксплуатации судна возникло несколько аварийных ситуаций, вызванных неисправностями СУД. Проанализируем неисправность, наиболее часто возникающую в период эксплуатации и приводящую к временному заклиниванию носовой плоскости левого борта ( $\delta_{НПstop}$ ) на максимальном отрицательном угле.

Анализ осциллограмм показал, что момент перекладки носовой плоскости на максимальный отрицательный угол совпадает с началом резкого роста крена  $\theta$  на левый борт со скоростью  $d\theta/dt = 5^\circ/c$ , и через 2 с крен превышает критическую по остойчивости СПК величину в  $9^\circ$ . Возникает рыскание, в результате которого судно уходит с курса на угол  $\varphi = 6,2^\circ$  со скоростью  $d\varphi/dt = 3,1^\circ/c$ . В этот момент плоскость правого борта перекадывается в ту же сторону для уменьшения крена, тем самым еще более заглубляя СПК по высоте движения (уменьшая клиренс) до водоизмещающего положения. По существующему противоаварийному алгоритму при превышении угла крена в  $9^\circ$  на правый или левый борт главные двигатели останавливаются, приводя СПК в водоизмещающее положение.

Ко второму типу отказов следует отнести выход из строя источников информации: датчика крена и дифферента (гировертикали), датчика скорости и датчика высоты. В период испытаний СПК был зафиксирован отказ датчика высоты, в качестве которого использовался опытный образец изделия "Предел". Когда отказал канал высотомера (было зафиксировано увеличение глубины погружения крыльев, что не соответствовало действительности), СУД переложила исполнительные органы ГПКК (носовые крылья и кормовые закрылки) в сторону уменьшения глубины погружения. Это привело к выходу судна из воды до полного оголения пересекающих элементов носового крыльевого комплекса (НKK). Только благодаря дистанционной остановке главных двигателей удалось избежать оголения нижнего крыла, что могло впоследствии привести к разрушению НKK.

Выход из строя высотомера является наиболее тяжелой неисправностью ввиду того, что высота учитывается в алгоритме выхода СПК на крыльевой режим:

$$h_{np}(V) = h_1 - \frac{h_1 - h_2}{V_2 - V_1}(V - V_1), \quad (5)$$

$$V_1 \leq V \leq V_2,$$

где:  $h_1$  – начальная глубина погружения,  $h_2$  – глубина погружения, соответствующая нормальному режиму движения корабля,  $V$  – скорость СПК ( $V_1 = 20$  узлов,  $V_2 = 40$  узлов)

Отсутствие информации о высоте исключает использование работоспособных каналов управления креном и дифферентом. Поэтому на СПК предусматривается дублирование или даже троирование высотомеров.



Можно воспользоваться еще одним способом устранения данной аварийной ситуации. Учитывая, что СПК является частично устойчивым при движении на крыльях, необходимо зафиксировать текущее значение высоты движения до момента аварии. Т.е. выполняется "замораживание" канала высоты, обеспечивающего балансировочное значение исполнительных органов, соответствующих высоте движения с начала аварии, вне зависимости от действия внешних возмущений.

Для иллюстрации данного предложения рассмотрим алгоритм программного изменения угла дифферента.

$$\psi_{пр} = \psi_1 - \frac{\psi_1 - \psi_2}{V_{max} - V} (V - V_3); \quad (6)$$

$$V_3 \leq V \leq V_{max}$$

где:  $\psi_1$  – начальный угол дифферента,  $\psi_2$  – угол дифферента на максимальной скорости. При этом  $V_3 = 30$  узлов,  $V_{max} = 55$  узлов для рассматриваемого СПК с ГПКК.

При выходе из строя датчика скорости ( $V = 0$ ) программный угол дифферента будет меняться со скоростью -  $d\psi/dt = 0,19^\circ/c$ . Низкая скорость изменения дифферента опасна т.к., оператор может ее не зафиксировать при движении СПК в режиме стабилизации курса в условиях морского волнения. Поэтому СУД должна обеспечивать контроль состояния средней величины ходового дифферента и осуществлять запрет его изменения до отрицательных значений. Кроме того, при выходе из строя датчика скорости, как и при выходе из строя высотомера, СПК будет подниматься из воды, что может привести к прорыву воздуха к нижним элементам носового крыльцевого комплекса и к последующему удару корабля о воду на скорости 50-60 узлов с вероятным разрушением НКК.

В подобной ситуации помимо метода «замораживания» скорости можно использовать подключение постоянной величины скорости хода вместо текущего значения в момент возникновения аварийной ситуации. Можно осуществлять косвенное измерение скорости хода по результатам измерения частоты вращения турбины винта, что формирует постоянную ошибку в определении скорости судна, но позволяет обеспечить крыльевой режим движения и исключает аварийную ситуацию.

Поскольку рассматривается движение СПК в крыльевом режиме на «загорбовых» скоростях (в узкой зоне кривой сопротивления), можно принять функцию  $n_{мс} = f(V)$  линейной, где  $n_{мс}$  – частота вращения турбины винта газотурбинного двигателя. Сама зависимость определяется экспериментально на тихой воде в диапазоне от минимальной «загорбовой» скорости хода СПК в крыльевом режиме до максимальной. При этом ошибка в определении скорости будет учитывать состояние моря, характеристики газотурбинного

двигателя, крыльевых комплексов и водоизмещение судна. Однако, как показали испытания СПК такого типа, величина ее будет составлять 2-5 узлов, что при расчёте дифферента и скорости является достаточным для обеспечения движения в крыльевом режиме.

Отметим ещё одну неисправность, которая не приводит к посадке СПК, но при движении в узкости может привести к аварийной ситуации (столкновению со встречным судном или берегом). Это самопроизвольное или по вине оператора уменьшение ходового дифферента до отрицательных значений  $\psi < 0$ , которое приводит к потере управляемости СПК по курсу, несмотря на перекладку вертикального руля на борт.

Для решения задачи обеспечения безопасности СПК в СУД, наряду с контурами, обеспечивающими выполнение основных функций по стабилизации, программному или следящему управлению заданными параметрами объекта, в системе формируются контуры, предназначенные для противоаварийного управления. Эти контуры обычно ограничивают значение основных координат в допустимых постоянных или функционально зависимых пределах.

Безопасность управления СПК определяется также объемом и надежностью информации, поступающей от датчиков. Поступление ложного сигнала на вход системы может привести к перекладке всех закрылков «на упор» и вызвать аварийную ситуацию, несущую угрозу безопасности судну. Поэтому при разработке технических средств управления движением повышенное внимание должно уделяться контролю отказов датчиков информации.

Обеспечить безопасность управления позволяет применение функционального и структурного резервирования. Для обработки избыточной информации может быть использован, например, один из обобщенных мажоритарных алгоритмов [15]. Поскольку в подобной структуре отключение на определенное время отдельных каналов практически не влияет на выходной сигнал, то упрощается ввод в резервированную СУД периодического тестового контроля каналов.

## 5. Статически устойчивое СПК с ГПККП

Особенности конструкции судов с пересекающимися элементами на носовом крыльевом комплексе (СПККП) обеспечивают СПК статическую устойчивость. Анализ гидродинамических характеристик носового крыльцевого комплекса выявил существенную зависимость подъемной силы от погружения. Боковая сила зависит от угла дрейфа, а также от параметров продольного движения – угла атаки и заглупления крыла, которые и обуславливают сильные перекрестные связи между параметрами бокового и продольного движения,

определяющие динамику судна при заклинивании исполнительных органов.

Исследования [16] показали, что ряд типовых неисправностей, связанных с заклиниванием, угрожает безопасности судна. Выявлено, что безопасность функционирования обеспечивается при исключении из управления носовых закрылков. При этом погрешности стабилизации по крену и дифференту на расчетном волнении в наиболее тяжелых режимах движения возрастают не более чем на 10%. В то же время наблюдается уменьшение вертикальных перегрузок и потерь скорости хода на 2-5%. Сопоставление указанных факторов при анализе результатов математического моделирования и натурных испытаний СПК данного типа позволило рекомендовать исключение носовых закрылков из состава исполнительных органов судов с крыльевой схемой рассматриваемого типа [17]. Данное решение позволяет: существенно сократить объем автоматизации, исключив из состава СУД каналы управления носовыми закрылками; сократить в половину количество гидроприводов и гидравлическое оборудование; перераспределить весовую нагрузку корабля в сторону увеличения запасов топлива; упростить конструкцию и повысить надежность носового крыльевого комплекса; снизить стоимость постройки и эксплуатации судна.

При заклинивании руля направления наблюдается разворот СПККП по курсу [18]. При этом на определенных курсовых углах могут возникнуть опасные крены, угрожающие безопасности. Однако в подобной ситуации судно располагает исполнительными органами – кормовыми закрылками, способными предотвратить аварию. Анализ различных алгоритмов показал, что наиболее эффективным является алгоритм, использующий наличие перекрестных связей между параметрами продольного и бокового движения. Он использует эффект уменьшения боковой силы на носовом крыльевом устройстве при уменьшении заглубления. Крен судна на всех курсовых углах не превышает допустимых значений, но наблюдается падение скорости вследствие возросшего ходового дифферента, а также медленный уход судна с курса. Попытка удержать СПККП, создавая разность тяг двигателей, не приводит к желаемому результату, так как возникающий момент  $M_{\phi}$  на 50 - 60% меньше момента, вызванного заклиниванием руля направления. Для предотвращения подобной ситуации целесообразно иметь два механически не связанных руля направления той же суммарной мощности. Учитывая, что одновременное механическое заклинивание обоих рулей направления маловероятно, такое решение позволит при заклинивании одного из рулей удерживать СПК на заданном курсе с помощью второго руля направления.

Результаты моделирования динамики СПККП при заклинивании одного из двух рулей

направления в положении  $\delta_{рн} = 10^\circ$  показывает, что противоаварийный алгоритм обеспечивает восстановление управляемости и позволяет осуществлять автоматическую стабилизацию судна на курсе. В случае механического заклинивания одного из рулей направления в режиме следящего дистанционного управления формируется сигнал рассогласования по курсу  $\Delta\phi = \phi_3 - \phi_и$ , где  $\phi_3$  – заданное положение руля направления,  $\phi_и$  – истинное положение руля направления. В предлагаемом противоаварийном алгоритме сигнал рассогласования по курсу заменяется на соответствующий сигнал от штурвала  $\delta_{шт}$ . При этом необходимо учесть, что при заклинивании руля направления в промежуточном положении ( $\delta_{рн} > 10^\circ$ ), второй руль направления должен быть отклонен в противоположную сторону на соответствующий угол  $\delta_{рн2} = -\delta_{рн1}$ , где  $\delta_{рн1(2)}$  – угол отклонения руля направления. Механическое заклинивание одного из кормовых закрылков не приводит к существенному ухудшению качества управления, так как стабилизация судна может осуществляться с помощью второго закрылка и руля направления. Для улучшения качества управления в этом случае следует предусмотреть возможность нулеустановления и стопорения заклинившего закрылка. Если же закрылок не может быть установлен в нулевое положение вследствие неисправности кинематической передачи, то судно будет способно функционировать по прямому назначению с ухудшением качества управления.

В ходе эксплуатации судна возможна ситуация, в которой движение осуществляется с отключенными каналами управления закрылками. В этом случае при движении на волнении возникает дополнительная качка по крену ( $10^\circ - 12^\circ$ ) и дифференту. Для ее уменьшения целесообразно стабилизировать бортовую качку с помощью руля направления.

Оценка влияния потери или разрушения гребных винтов на динамику судна производилась на модели продольного движения. В процессе моделирования принято, что разрушение (потеря) винтов происходит в момент времени  $t = 0$  и приводит к скачкообразному уменьшению тяги на 33%, 66% или 100%. Анализ результатов показывает, что разрушение винтов приводит к торможению корабля вплоть до перехода в водоизмещающее положение, сопровождающееся ростом дифферента. Промежуток времени от момента разрушения до момента срыва крыльевого режима при потере одного, двух и трех винтов составляет соответственно 40 с, 10 с и 4,6 с. В связи с тем, что касание корпусом судна воды происходит с незначительной скоростью  $V = 0,5 - 0,6 V_0$ , (где  $V_0$  – скорость движения судна при движении на крыльях) и с положительным дифферентом, ситуация не считается аварийной, влияющей на безопасность судна, однако, очевидно

характеризует возможность торможения посредством остановки двигателей.

Влияние уменьшения скорости перекадки исполнительных органов исследовалось при функционирующей системе управления. Рассматривался случай возникновения типовой неисправности, приводящей к уменьшению

### Заключение

По результатам проведённых исследований предлагается следующая классификация неисправностей, приводящих к аварийным ситуациям: неисправности, создающие угрозу для безопасности судна (аварийный режим); неисправности, приводящих к потере управляемости (предаварийный режим); неисправности, приводящие к незначительному ухудшению основных характеристик движения судна.

Обеспечение безопасности движения СПК, оборудованных СУД, достигается: выбором рациональной структуры и обоснованными характеристиками надёжности технических средств движения; рациональным составом, эффективностью и надёжностью исполнительных органов; функциональным и структурным резервированием каналов СУД и источников информации; контролем и диагностированием состояния технических средств и параметров движения; прогнозированием характера развития аварийных ситуаций; выбором исправных исполнительных органов и обеспечением с их помощью безопасного движения и управления СПК в аварийных ситуациях.

Для решения задач безопасности на этапе разработки системы управления необходимо

максимальной скорости перекадки на 50% для различных КУВ.

Результаты исследования показали, что подобная типовая неисправность отражается только на качестве стабилизации, но не приводит к срыву крыльевого режима движения СПККП или каким-либо другим опасным последствиям. сформировать перечень опасных значений координат, требующих ограничения в различных условиях эксплуатации. Эти координаты могут характеризовать как СПК (например, допустимые по условию безопасности углы крена, дифферента и т.п.), так и части управляющего комплекса: углы перекадки исполнительных органов, параметры главных двигателей и т.п. Кроме того, необходимо выявить типовые неисправности технических средств управления движением и исследовать их влияние на параметры движения, определить исполнительные органы, влияющие на указанные параметры, а также выбрать рациональную структуру СУД, исключающую возможность возникновения неисправностей. Другими словами требуется найти решение задачи обеспечения безопасности СПК при отказах технических средств.

Безусловное обеспечение безопасности движения СПК не может быть реализовано без использования специализированных алгоритмов противоаварийной автоматизации, использующей возможности косвенного измерения наиболее ответственных параметров движения судов на подводных крыльях

### Благодарности

Публикация выполнена в рамках государственного задания №8.7141.2017/8.9 Минобрнауки России.

The research work was supported by The Ministry of Education and Science of the Russian Federation (task #8.7141.2017/8.9).

### Литература

1. Маскалик А.И. и др. Крылатые суда России. История и современность. СПб.: Судостроение, 2006. 240 с.
2. Злобин Г.П., Смигельский С.П. Суда на подводных крыльях и воздушной подушке (по материалам иностранной печати). Л.: Судостроение, 1976. 263 с.
3. Макливи Р. Суда на подводных крыльях и воздушной подушке: пер. с англ. Л.: Судостроение, 1981. 208 с.
4. Ваганов А.М. Проектирование скоростных судов. Л.: Судостроение, 1978. 279 с.
5. Иконников В.В., Маскалик А.И. Особенности проектирования и конструкции судов на подводных крыльях. Л.: Судостроение, 1987. 313 с.
6. Колызаев Б.А., Косоруков А.И., Литвиненко В.А. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания. Л.: Судостроение, 1980. 472 с.
7. Клейтон Б., Бишоп Р. Механика морских судов. Л.: Судостроение, 1986. 436 с.
8. Артамонов В.С. и др. Проблемы безопасности водного транспорта при чрезвычайных ситуациях. СПб.: УГПС МЧС РФ, 2010. 364 с.
9. Короткин И. М. Аварии судов на воздушной подушке и подводных крыльях. Л.: Судостроение, 1981. 216 с.
10. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Безотказность систем управления движением // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 1. № 1 (39). С. 185-194.

11. Скороходов Д.А. и др. Опыт создания и эксплуатации систем управления движением кораблей с динамическими принципами поддержания / Материалы XX11 Всероссийской конференции по управлению движением кораблей и специальных аппаратов. ИПУ РАН. Москва-Адлер, 1996. 221 с.
12. Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Исследование алгоритмической структуры системы управления движением судна на подводных крыльях // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т. 1. № 1 (39). С. 153-163.
13. Скороходов Д.А. Системы управления движением кораблей с динамическими принципами поддержания. СПб.: ЦНИИ Электроприбор, 2000. 282 с.
14. Скороходов Д.А., Житников В.В., Никитюк Ю.Т. Система управления многодвигательной газотурбинной установкой судна на подводных крыльях // Вопросы кораблестроения. Корабельная автоматика. 1979. № 8. С.113-117.
15. Протокол испытаний головной системы «Бирюза-2» на судне «Колхида». Потти: НПО Аврора, 1982. 194 с.
16. Скороходов Д.А., Антипов В.В., Подгорец В.Я. Адаптивная система управления движением судна на подводных крыльях / Автоматизация морских судов и систем их обслуживания. Л.: Судостроение, 1985. 367 с.
17. Богданов А. Г., Каминский В. Ю., Скороходов Д. А. Синтез оптимальных характеристик гидроприводов управления движением // Морские интеллектуальные технологии. 2017Т. 2. № 2 (36). С. 47-55.
18. Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А. Навигация и управление движением судов. СПб.: Элмор, 2002. 360 с.

### References

1. Maskalik A.I. i dr. Krylatye suda Rossii. Istorija i sovremennost' [Cruise ships in Russia. History and modernity]. SPb. Sudostroenie, 2006. 240 p.
2. Zlobin G.P., Smigel'skij S.P. Suda na podvodnyh kryl'jah i vozduhnoj podushke (po materialam inostrannoj pečati) [Hydrofoils and air cushion]. L. Sudostroenie, 1976. 263 p.
3. Maklivi R. Suda na podvodnyh kryl'jah i vozduhnoj podushke: per. s angl [Hydrofoils and air cushion]. L. Sudostroenie, 1981. 208 p.
4. Vaganov A.M. Proektirovanie skorostnyh sudov [Design of high-speed vessels]. L. Sudostroenie, 1978. 279 p.
5. Ikonnikov V.V., Maskalik A.I. Osobennosti proektirovanija i konstrukcii sudov na podvodnyh kryl'jah [Features of design and construction of hydrofoils]. L. Sudostroenie, 1987. 313 p.
6. Kolyzaev B.A., Kosorukov A.I., Litvinenko V.A. Spravochnik po proektirovaniju sudov s dinamičeskimi principami podderžhanija [The reference design ships with dynamic principles of maintenance]. L. Sudostroenie, 1980. 472 p.
7. Klejton B., Bishop R. Mehanika morskikh sudov [Mechanics of marine vessels]. L. Sudostroenie, 1986. 436 p.
8. Artamonov V.S. i dr. Problemy bezopasnosti vodnogo transporta pri chrezvyčajnyh situacijah [Problems of water transport safety in emergency situations]. SPb. UGPS MChS RF, 2010. 364 p.
9. Korotkin I. M. Avarii sudov na vozduhnoj podushke i podvodnyh kryl'jah [Crash hovercrafts and hydrofoils]. L. Sudostroenie, 1981. 216 p.
10. Kaminskij V.Ju., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Bezotkaznost' sistem upravlenija dvizheniem [Reliability of motion control systems] // Morskie intellektual'nye tehnologii. 2018. Т. 1. № 1 (39). pp. 185-194.
11. Skorohodov D.A. i dr. Opyt sozdanija i jekspluatacii sistem upravlenija dvizheniem korablej s dinamičeskimi principami podderžhanija [Experience in the creation and operation of motion control systems for ships with dynamic principles of maintenance] / Materialy HH11 Vserossijskoj konferencii po upravleniju dvizheniem korablej i special'nyh apparatov. IPU RAN. Moskva-Adler, 1996. 221 p.
12. Kaminskij V.Ju., Marinov M.L., Skorohodov D.A., Turusov S.N. Issledovanie algoritmičeskoj struktury sistemy upravlenija dvizheniem sudna na podvodnyh kryl'jah [Investigation of the algorithmic structure of the hydrofoil motion control system] // Morskie intellektual'nye tehnologii. 2018. Т. 1. № 1 (39). pp. 153-163.
13. Skorohodov D.A. Sistemy upravlenija dvizheniem korablej s dinamičeskimi principami podderžhanija [The traffic management system ships with dynamic principles of maintenance]. SPb. CNII Jelektropribor, 2000. 282 p.
14. Skorohodov D.A., Zhitnikov V.V., Nikitjuk Ju.T. Sistema upravlenija mnogodvigatel'noj gazoturbinoj ustanovkoj sudna na podvodnyh kryl'jah [Control system multi-engine gas turbine installation vessel on underwater wings] // Voprosy korablestroenija. Korabel'naja avtomatika. 1979. № 8. pp.113-117.
15. Protokol ispytanij golovnoj sistemy «Birюза-2» na sudne «Kolhida» [The test head system "Turquoise-2" on the ship "Kolkhida"]. Poti. NPO Avrora, 1982. 194 p.

16. Skorohodov D.A., Antipov V.V., Podgorec V.Ja. Adaptivnaja sistema upravlenija dvizheniem sudna na podvodnyh kryl'jah [Adaptive motion control of hydrofoil] / Avtomatizacija morskikh sudov i sistem ih obsluzhivaniya. L. Sudostroenie, 1985. 367 p.

17. Bogdanov A. G., Kaminskij V. Ju., Skorohodov D. A. Sintez optimal'nyh harakteristik gidroprivodov upravlenija dvizheniem [Synthesis of optimal characteristics of motion control hydraulic drives] // Morskie intellektual'nye tehnologii. 2017. T. 2. № 2 (36). pp. 47-55.

18. Lukomskij Ju.A., Peshehonov V.G., Skorohodov D.A. Navigacija i upravlenie dvizheniem sudov [Navigation and vessel traffic management]. SPb. Jelmor, 2002. 360 p.

УДК 614.8424/847:629.5

## ИНФОРМАЦИОННО-АКСИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ НА МОРСКИХ И РЕЧНЫХ СУДАХ

**Владимир Николаевич Круглеевский**

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник,  
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН  
199178, Санкт-Петербург, 12 линия ВО, 13  
e-mail: skpo@bk.ru

**Маринов Марин Любенов**

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник  
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН  
199178, Россия, Санкт-Петербург, 12 линия В.О., д. 13  
e-mail: marinlomsky@gmail.com

**Дмитрий Алексеевич Скороходов**

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник  
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН  
199178, Санкт-Петербург, 12 линия ВО, 13  
e-mail: skorohodda@mail.ru

### Аннотация

В статье рассматриваются возможные подходы к автоматизации процессов контроля человеком пожарной опасности в помещениях морских и речных судов на базе современных систем пожарной сигнализации, интегрированных систем управления и применения новых технологий. Предлагается автоматизировать процесс разведки района пожара за счет повышения информативности систем пожарной сигнализации в объеме, достаточном для выработки руководителем борьбы с пожаром решения на применение средств пожаротушения. Это позволит значительно сократить время между обнаружением пожара и началом его тушения. Рассматриваются задачи, которые для этого должны быть решены, и пути их решения, в том числе, использование информационных технологий для повышения эффективности обучения и тренировок членов экипажа по обеспечению пожарной безопасности и борьбе с пожаром и внедрение автоматического контроля нагрева узлов электрического и энергетического оборудования.

**Ключевые слова:** система пожарной сигнализации, контроль пожарной опасности, автоматизация, человеческий фактор, распознавание, когнитивные функции, беспроводные системы, системы радиочастотной идентификации, тепловизоры.

## INFORMATIONAL-AXIOLOGICAL ASPECTS OF AUTOMATION OF CONTROL OF FIRE DANGER AT SEA AND RIVER VESSELS

**Vladimir N. Krugleevsky**

doctor of technical Sciences, associate Professor, leading researcher  
The institute of transport problems. name N.S. Solomenko of the Russian academy of sciences  
12-ya liniya VO, 13, Saint-Petersburg, 199178  
e-mail: skpo@bk.ru

**Marin L. Marinov**

PhD, leading researcher  
The institute of transport problems. name N.S. Solomenko of the Russian academy of sciences  
12-ya liniya VO, 13, Saint-Petersburg, 199178  
e-mail: marinlomsky@gmail.com

**Dmitriy A. Skorokhodov**

doctor of technical Sciences, full Professor, chief researcher officer  
The institute of transport problems. name N.S. Solomenko of the Russian academy of sciences  
12-ya liniya VO, 13, Saint-Petersburg, 199178  
e-mail: skorohodda@mail.r

### Abstract

The article deals with the possible approaches to the automation of the processes of human control of fire danger in the premises of sea and river vessels on the basis of modern fire alarm systems, integrated control systems and the use of new technologies. It is proposed to automate the process of exploration of the area of the fire by increasing the informativeness of fire alarm systems sufficient to generate the head of the fire fighting decisions on the use of fire extinguishers. This will significantly reduce the time between the detection of the fire and the beginning of its extinguishing. The problems that must be solved for this purpose, and the ways of their solution, including the

use of information technologies to improve the efficiency of training and training of crew members to ensure fire safety and fire control and the introduction of automatic control of heating units of electrical and power equipment.

**Keywords:** fire alarm system, fire danger control, automation, human factor, recognition, cognitive functions, wireless systems, radio frequency identification systems, thermal imagers.

В настоящее время господствует четкое представление, отраженное в соответствующих нормативных документах, о том, что обеспечивает пожарную безопасность и осуществляет ее повседневный контроль экипаж судна, а системы пожарной сигнализации (СПС) предназначены для обнаружения уже начавшегося пожара и должны распознать его на ранней стадии развития.

Автоматизация контроля пожарной опасности на морских и речных судах находится в зачаточном состоянии и ограничивается в основном использованием переносных средств диагностического контроля (в том числе пирометров и тепловизоров) для определения состояния пожароопасного оборудования и технических средств.

В то же время существенный прогресс можно наблюдать в области совершенствования характеристик пожарных извещателей и аппаратуры СПС: они позволяют обнаружить место появления опасных факторов пожара (дыма, пламени, аномальное повышение температуры воздуха, наличие угарного газа) с точностью до зоны, контролируемой пожарным извещателем. Чувствительность пожарных извещателей повысилась в разы, а их инерционность снизилась. Современные СПС способны обмениваться информацией с другими автоматизированными системами управления, контроля и сигнализации, имеющимися на судне. Достоверность формируемых СПС сигналов обеспечивается применением помехоустойчивых методов обработки первичной информации и контролем параметров, имеющих различную физическую природу. Так называемые, «ложные срабатывания» СПС случаются все реже. В основном они происходят по причине неудачного размещения пожарных извещателей в зонах, где работа судовых систем и технических средств или открытие дверей (люков) могут вызывать изменения контролируемых параметров, аналогичные проявлению опасных факторов пожара.

Стремление обнаружить пожар на судне как можно раньше и предотвратить его дальнейшее развитие заставляет анализировать сферу разнообразной деятельности человека по поддержанию требуемого уровня пожарной безопасности, его действия при обнаружении и борьбе с пожарами и искать новые пути повышения эффективности.

Статистические данные показывают, что причиной порядка 85% пожаров на морских и речных грузовых и пассажирских судах являются

нарушения членами экипажа (пассажирами) правил по обеспечению пожарной безопасности и эксплуатации судового оборудования, технических средств и систем. Это означает, что уровень пожарной опасности в помещениях судна в значительной степени зависит от качества подготовки членов экипажа и их личных психологических качеств.

Автоматизация контроля пожарной опасности на судне подразумевает создание организационно-технической системы, где каждый член экипажа является её составной частью. При обнаружении признаков пожарной опасности и пожара он должен действовать в соответствии с нормативными документами и должностными обязанностями, регламентирующими его поведение.

Считая человека составной частью системы контроля пожарной опасности, надо помнить, что он одновременно выступает и в другом качестве. При управлении или обслуживании судовых технических средств и оборудования, он может создать условия для возникновения пожароопасной ситуации. Структура комплекса задач, относящихся к так называемому «человеческому фактору» автоматизации контроля пожарной опасности, представлена на рис. 1.

В процессе распознавания человеком сложившейся в помещении пожароопасной ситуации можно выделить собственно два этапа: восприятие окружающей обстановки и распознавание признаков пожарной опасности. Оба процесса сопровождаются сложной психической деятельностью человека, на которую немаловажное влияние оказывает уровень знаний и качество выработанных при обучении навыков.

Контроль уровня подготовки членов экипажа судна необходим для реализации развитого интерфейса между технической системой и членами экипажа. При изучении устройства судна, правил эксплуатации технических средств, ведения борьбы с пожаром и обеспечения пожарной безопасности, использование компьютерных технологий позволяет реализовать автоматическое получение информации об уровне подготовки каждого члена экипажа и ввод их в систему. Следует отметить, что эти данные могут быть использованы системой в полной мере только при условии реализации контроля местонахождения членов экипажа.





Рис. 1. «Человеческий фактор» при обеспечении пожарной безопасности

Очевидно, что для повышения эффективности обеспечения пожарной безопасности судна необходимо снизить вероятность возникновения возгорания, автоматизировать процессы контроля опасности и сократить время между обнаружением пожара и началом действий по локализации и тушению пожара. Известные на сегодня технологии позволяют это сделать.

Несмотря на существенные достоинства современных СПС, формируемый ими сигнал «ПОЖАР» требует подтверждения, а для формирования управляющих решений по локализации и тушению пожара необходима дополнительная информация, в первую очередь, о том, что горит, зоне распространения огня и дыма, интенсивности процесса развития пожара, а затем, по мере увеличения масштаба пожара, о путях его распространения, опасности для смежных помещений. Эту информацию получают спустя некоторое время с момента обнаружения СПС проявившихся опасных факторов пожара из докладов разведчиков при проведении обследования охваченного пожаром района судна.

Таким образом, те десятки секунд, на которые удалось сократить время обнаружения пожара

путем совершенствования СПС, обесцениваются минутами (иногда и более), затрачиваемыми на организацию и проведение разведки.

Поэтому на современном этапе развития судовых СПС необходимо повысить их информативность и реализовать в них такие функции процесса разведки района пожара, как получение информации в объеме, достаточном для выработки руководителем борьбы с пожаром решения на применение средств пожаротушения. Практическое воплощение этих функций потребует, чтобы СПС могла воспринимать информацию от своих органов чувств, которыми являются сенсоры пожарных извещателей (познавать окружающий мир), накапливать и обрабатывать эту информацию (запоминать) обмениваться информацией с другими системами контроля и сигнализации (общаться), распознавать пожароопасные ситуации и прогнозировать их развитие (примитивное мышление). По существу СПС будет наделена когнитивными функциями.

Задачи, которые должны быть решены для повышения информативности СПС, отражены на рис. 2. Более подробная информация о том, как они могут быть реализованы, содержится в опубликованных ранее источниках [1-6].



Рис. 2. Предложения, внедрение которых будут способствовать повышению информативности системы пожарной сигнализации

Сегодня, при обучении членов экипажа судна правилам обеспечения пожарной безопасности, проведении тренировок по борьбе с пожаром и при осуществлении контроля усвоенных ими знаний и полученных навыков, информационные технологии практически не используются. В то же время, технологии разработки обучающих анимационных фильмов, развивающих интерактивных игровых программ, программ для тестирования знаний и психологических характеристик людей, позволяющие контролировать и оценивать уровень подготовки обучаемых, известны и широко применяются на практике. Все эти информационные продукты должны использоваться в процессе обучения членов экипажа судна и для дальнейшего поддержания на высоком уровне полученных знаний и выработанных навыков, психологической готовности к выполнению своих должностных обязанностей при борьбе с пожаром.

Обеспечение пожарной безопасности и раннее обнаружение пожаров неизбежно связано с контролем температуры не только воздушной среды в помещениях судна, но и многих узлов энергетических установок, различных механизмов, элементов электроэнергетической системы, перегрев которых может вызвать возгорание горючих жидкостей и материалов, находящихся поблизости. При этом контакт горючего вещества и поверхности, нагретой до

температуры превышающей температуру воспламенения этого вещества, может происходить в результате аварий, вызывающих различного рода разрушения. Сегодня контроль нагрева узлов электрического и энергетического оборудования проводится периодически и всецело зависит от профессионализма и ответственности конкретных судовых специалистов.

Известен способ автоматического обнаружения пожарной опасности в помещении судна [7], основанный на контроле и прогнозировании изменения температуры и координат в пространстве судовых помещений источников тепла и горючих веществ. Для его осуществления необходимо периодически получать данные о температуре потенциальных источников возгорания и непрерывно контролировать изменение обстановки в помещении.

Автоматический контроль нагрева узлов электрического и энергетического оборудования может быть реализован путем:

- перехода от периодического контроля к on-line технологиям;
- применения микроэлектронных датчиков температуры;
- применения беспроводных технологий;
- использования тепловизоров.

Многие разработчики технических средств уже обеспечили или внедряют автоматический

контроль теплонагруженных узлов. Учитывая, что современные проекты морских и речных судов предусматривают установку систем управления техническими средствами и судовыми системами с высоким уровнем автоматизации процессов контроля технологических процессов и, как правило, они объединены в интегрированную автоматизированную систему управления судном, организовать централизованный сбор необходимой информации не вызывает технических трудностей.

В качестве примера можно привести беспроводную систему мониторинга температуры фирмы Schneider Electric, которая состоит из трех компонент: датчики (беспроводные передатчики), которые позволяют измерять температуру нагрева от 0 до 150 °С, приемники, обеспечивающие прием сигналов, и программного обеспечения обработки информации, сигнализации и представления информации оператору. Система разработана и уже давно предлагается к поставке. Информация об общих принципах построения системы и рекомендации о местах установки датчиков температуры, приведенная в техническом руководстве [8], полезна при разработке беспроводной системы контроля температуры узлов электрооборудования.

Также следует отметить перспективность применения систем радиочастотной идентификации и регистрации объектов (сокращенно РЧИ-системы, от английского RFID — Radio Frequency IDentification), которые представляют собой совокупность электронных средств автоматизированного контроля и сбора информации о различных объектах, таких как транспорт, персонал, грузы, товары, ценности и др. РЧИ-системы все чаще используются для контроля температуры подвижных и вращающихся узлов энергетических установок (дизелей, газотурбинных двигателей), нагретых

до высоких температур, а также электрооборудования, находящегося под напряжением [9]. При этом беспроводные системы сигнализации оказываются при сравнении с проводными более устойчивыми к электромагнитным помехам [10].

Практически на всех современных судах устанавливаются различные по своим функциональным возможностям системы телевизионного наблюдения и мониторинга в том числе обстановки в судовых помещениях. Программное обеспечение некоторых из них позволяет автоматически обрабатывать получаемые изображения и распознавать появление клубов дыма, очагов возгорания, разрушение оборудования, смещение грузов и т.п. В последнее время появились относительно дешевые тепловизионные камеры, которые встраиваются в системы телевизионного мониторинга и используются для on-line наблюдения за нагревом энергетических установок.

### Заключение

Учитывая изложенное выше, в качестве основных направлений повышения эффективности обеспечения пожарной безопасности судов можно указать [5, 11]:

- повышение информативности судовых систем пожарной сигнализации;
- использование информационных технологий для повышения эффективности обучения и тренировок членов экипажа по обеспечению пожарной безопасности и борьбе с пожаром;
- внедрение автоматического контроля нагрева узлов электрического и энергетического оборудования.

### Литература

1. Артамонов В.С., Круглеевский В.Н., Скороходов Д.А., Поляков А.С. Судовые системы пожарной сигнализации: От прошлого — в будущее. // Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2013.
2. Круглеевский В.Н., Марковский А.В., Марковский М.В., Михненко М.В., Колесник В.А. Процесс контроля пожарной опасности в корабельных помещениях как задача распознавания образов. // Морской Вестник № 2 (54) 2015, с. 105-108.
3. Круглеевский В.Н., Стариченков А.П. Самообучающиеся судовые системы пожарной сигнализации // Транспорт Российской Федерации № 3 (66) 2016 г., с. 50-52.
4. Круглеевский В.Н., Образцов И.В. Анализ возможности применения беспроводных систем сигнализации и контроля пожарной безопасности технических средств кораблей на основе технологии радиочастотной идентификации. // N&ES Research, Том VIII. Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли № 3 2016, с. 41-48.
5. Круглеевский В.Н., Соколенко О.А., Цапков А.П. Перспективы применения мультикритериального способа обработки сигналов пожарных извещателей в корабельных системах пожарной сигнализации // Военный инженер № 2 (4), 2017, с. 23-32.
6. Способ автоматического обнаружения начальных стадий пожаров в помещениях пожароопасных объектов, содержащих тепловыделяющее оборудование. // Патент № 2646204 РФ, 2018.
7. Способ обнаружения пожарной опасности и пожара в помещении судна. // Патент № 2179470 РФ, 2002.
8. Wireless Temperature Monitoring System. Application Manual 0180IB0801R03/11. SQUARE D by Schneider Electric, 2011.

9. Switchgear Temperature Monitoring System. SENGENUITY. Sensor Engine Technology. A Division of Vectron International. [www.sengenuity.com](http://www.sengenuity.com).

10. Катанович А.А. Устойчивость систем аварийной сигнализации к электромагнитным помехам. Судостроение № 2, 2011, с. 43-45.

11. Маринов М.Л. Проблемы и перспективы оценки поведения руководителей и специалистов в профессиональной сфере // Вестник Тихоокеанского государственного университета, 2015, №4(39), С.215-224.

#### Refereces

1. Artamonov V. S., Krugleevsky V. N., Skorokhodov D. A., Polyakov A. S. Ship fire alarm systems: from the past to the future. // Saint-Petersburg University of state fire service of EMERCOM of Russia, 2013.

2. Kreglewski V. N., A. Markov" Markov, M. V., Minenok M. V., Kolesnik V. A. the Process of monitoring of fire danger in the ship areas as a problem of pattern recognition. // Marine Bulletin № 2 (54) 2015, pp. 105-108.

3. Kreglewski WN.' Starichenkov A. L. Learning of the ship fire alarm system // Transport of the Russian Federation № 3 (66) 2016, pp. 50-52.

4. Kruglanski V. N., Obratsov I. V. the Analysis of possibility of using wireless alarm systems and control fire safety technical means of ships based on RFID technology. // H & ES Research, Volume VIII. Science-intensive technologies in space research of the earth № 3 2016, pp. 41-48.

5. Kreglewski V. N., Sokolenko O. A., Tsapkov, A. P. prospects for the use of multicriterial method of processing signals of the detectors in the ship fire alarm systems // Military engineer No. 2 (4), 2017, pp. 23-32.

6. Method of automatic detection of initial stages of fires in premises of fire-dangerous objects containing heat-emitting equipment. // Patent No. 2646204 Russia' 2018.

7. Method of detection of fire danger and fire in the ship's premises. // Patent No. 2179470 of the Russian Federation' of 2002.

8. Wireless Temperature Monitoring System. Application manual 0180IB0801R03 / 11. SQUARE D by Schneider Electric, 2011.

9. Switchgear Temperature Monitoring System. SENGENUITY. Sensor Engine Technology. A Division of Vectron international. [www.sengenuity.com](http://www.sengenuity.com).

10. Katanovich A. A. Stability of alarm systems to electromagnetic interference. Shipbuilding № 2, 2011, pp. 43-45.

11. Marinov M.L. Problems and perspectives of the performance of managers and specialists in the professional field // Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2015. – №4(39). – s.215-224.

**УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

УДК 004.41

**УНИВЕРСАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ КАК ИНСТРУМЕНТ РЕАЛИЗАЦИИ ЦЕЛОСТНОГО ПОДХОДА В УПРАВЛЕНИИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ****Виктор Иванович Гнатык**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики,  
Калининградский государственный технический университет  
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1.  
e-mail: [mail@gnatukvi.ru](mailto:mail@gnatukvi.ru)

**Александр Алексеевич Меркулов**

начальник технопарка  
Калининградский государственный технический университет  
236022, Калининград, Советский проспект, 1  
e-mail: [alexandr.merkulov@klgtu.ru](mailto: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](mailto:abdurashid.yafasov@klgtu.ru)

**Аннотация**

Быстрое развитие цифровой экономики поставило перед фактом необходимость существенного расширения информационных технологий в управлении социальными и экономическими системами. Одним из важных инструментов управления в таких системах становятся ситуационные центры (СЦ). В данной работе в едином концепте технетики, теории жизнеспособных целостных систем и инвариантности рассмотрена универсальная модель организации, открывающая возможность ускорения процессов создания СЦ. При таком подходе обеспечивается самовоспроизводство инвариантных свойств организаций: целостность, системная дифференциация, открытость организации, редукция комплексности, операционная замкнутость, самореференция, коммуникация и смысл. Предлагаемая универсальная модель организации является новым инструментом в проектировании СЦ для управления социально-экономическими системами в цифровой экономике. Модель открывает принципиально новые возможности быстрого развертывания сети распределенных ситуационных центров в различных организациях вне зависимости от вида деятельности, форм собственности и масштабов деятельности и создает предпосылки для ускорения перерастания СЦ в Центры развития организаций. Предложена иерархическая последовательность системообразующих компонент территориальной эргатической сетевой системы управления социально-экономическими системами.

**Ключевые слова:** управление социально-экономическими системами, универсальная модель организации, информационно-аналитическая система поддержки принятия решений, ситуационный центр, сеть распределенных ситуационных центров.

**UNIVERSAL MODEL OF THE ORGANIZATION AS A TOOL FOR IMPLEMENTATION OF THE INTEGRAL APPROACH IN THE MANAGEMENT OF SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS****Victor I. Gnatyuk**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
professor of the Department of Electrical Equipment of Vessels and Electric Power Industry,  
Kaliningrad state technical university,  
1 Sovietsky prospect, Kaliningrad, 236022, Russian Federation  
e-mail: [mail@gnatukvi.ru](mailto:mail@gnatukvi.ru)

**Alexander A. Merkulov**

Head of Technopark, Kaliningrad State Technical University  
1 Sovietsky prospect, Kaliningrad, 236022, Russian Federation  
e-mail: [alexandr.merkulov@klgtu.ru](mailto:alexandr.merkulov@klgtu.ru)

**Abdurashid Ya. Yafasov**

Doctor of technical sciences, professor,  
head of innovation activity department,

Kaliningrad state technical university,  
1 Sovietsky prospect, Kaliningrad, 236022, Russian Federation  
e-mail: mail@gnatukvi.ru

### Abstract

The rapid development of the digital economy has put before the fact the need for a significant expansion of information technology in the management of social and economic systems. Situational centers (SC) become one of the important management tools in such systems. The universal model of organization, which opens the possibility of accelerating the processes of creating SCs, is considered. In this paper, in a single concept of technology, the theory of viable integral systems and invariance. Self-reproduction of invariant properties of organizations: integrity, systemic differentiation, openness of the organization, reduction of complexity, operational isolation, self-reference, communication and meaning are provided with this approach. The proposed universal model of the organization is a new tool in the design of the SC for the management of socio-economic systems in the digital economy. The model opens up fundamentally new opportunities for the rapid deployment of a network of distributed situational centers in various organizations, regardless of the type of activity, forms of ownership and scale of activity and creates the prerequisites for accelerating the development of SCs into the Development Centers of Organizations. A hierarchical sequence of system-forming components of a territorial ergatic network management system for socio-economic systems is proposed.

**Key words:** management of socio-economic systems, universal model of organization, information-analytical decision support system, situational center, network of distributed situational centers.

### Введение

В связи с развитием цифровой экономики [1-5] расширяются возможности и потребности использования информационных технологий в управлении социальными и экономическими системами. Под цифровой экономикой в данном случае подразумеваются возможности создания цифровых моделей организаций реальной экономики, обеспечивающих формализацию и учет ресурсов и процессов реальной экономики (финансовых, информационных, материальных и иных ресурсов, кризисных, трансформационных, инвестиционных и иных процессов).

Одним из важных инструментов управления в этом направлении являются ситуационные центры (СЦ) [6-8], число которых растет в мире по нарастающей, в частности, в Российской Федерации их количество к началу 2018 года превысило несколько сот, с десятками разновидностей.

Ситуационные центры должны стать эффективным инструментом государственного управления в целях устойчивого развития международных сообществ в условиях глобализации [9-11], государства [12,13], регионов и отраслей экономики [14], предотвращения кризисных явлений в экономических и социальных системах. Они способны оказать существенное влияние на сбалансированное развитие ресурсно-сырьевой, производственной, научно-технологической и финансовой сфер, стать важным фактором недопущения снижения качества жизни населения в условиях турбулентной экономики. И, наконец, с учетом политических рисков и непрекращающихся санкций со стороны ряда западных стран - обеспечить противодействие угрозам экономической безопасности страны, вызовом отдельных территорий и отраслей экономики.

В частности, типичной территорией России, подверженной внешнеэкономическим и внешнеполитическим рискам устойчивого развития, является Калининградская область в силу специфики своего географического анклавного расположения. Поэтому создание СЦ «Регион» в Калининградской области является осознанной необходимостью, причем, с учетом неоднородной картины развития приморских муниципальных образований становится очевидным необходимость одновременной организации системы распределенных СЦ (СРСЦ) в муниципалитетах по типу «Интеллектуальный муниципалитет» [15,16].

Особую важность создания СРСЦ в условиях перехода к цифровой экономике отметил один из ведущих специалистов в этой области А.А. Зацаринный на открытии, а позже в работе секции «Ситуационные центры в региональных органах государственной власти» VII конференции «Ситуационные центры: фокус кросс-отраслевых интересов», прошедшей 20-21 сентября 2017 года в Москве [7]. Конференция показала, что при создании СЦ и внедрении инструментов ситуационного управления разработчики сталкиваются с рядом трудностей, возникающих в процессе сбора и анализа данных, интеграции информационных ресурсов, освоения аналитических систем.

Если к этому добавить, что промышленная революция радикально изменила представления о социальной роли пространства и времени в глобальной динамике [17,18], но при этом роль человека, его интеллекта с одной стороны является основным и наиболее важным ресурсом современной экономики и является таким же органичным элементом производственного или управленческого процесса со всеми возможностями оптимизации его применения, актуальность проблемы

реализации целостного подхода в управлении социально-экономическими системами не вызывает сомнения. Весьма важным представляется проектирование СЦ как организационно-технической системы с учетом социально-экономической модели общественной среды, для которой создается тот или иной СЦ, так как «цифровизация» мышления и формирование системы человек-компьютер кардинально и динамично меняет мировосприятие и мировоззрение человека, общественных групп, социума. Отсюда важной задачей представляется разработка универсальной модели организации и создание на ее основе методики проектирования СЦ как эргатической системы<sup>1</sup>, сочетающей возможности тиражирования типовых проектных решений с учетом уникальных характеристик каждой организации. Такая универсальная модель может стать инструментом реализации целостного подхода в управлении социально-экономическими системами. В данной работе предлагаются концептуальные подходы к созданию универсальной модели организации.

#### **Ситуационный центр как эргатическая система**

В общем виде распределенную сеть СЦ в качестве основы организации государственного управления в цифровой экономике можно представить в виде сетевой фрактальной модели эргатических систем в экономике страны. Важно подчеркнуть, что СЦ являются эргатическими системами - сложными системами управления, в которых составным и обязательным элементом является человек.

В работе [18] Зацаринным А.А. и Шабановым А.П. на основе анализа опыта создания и применения СЦ различного назначения отмечается существенное влияние человеческого фактора на эффективность СЦ, причем это влияние человеческого фактора меняется во времени. Авторы обосновывают применение в качестве показателя эффективности время выполнения работ, а роль человеческого фактора – отношением числа готовых сценариев к прогнозируемому максимально возможному числу сценариев, так как чем больше проанализированных сценариев, тем меньше неопределенность для принятия решений и тем выше эффективность СЦ.

Известный российский экосоциолог О.Н. Яницкий обратил внимание на то, что

информационные технологии, ритейл, финансовые операции отодвинули на второй план приоритеты человеческого и социального капитала [19], но с другой стороны, промышленная революция радикально изменила представления о социальной роли пространства и времени, сформировав гибридный «Человек-Компьютер». В качестве предельного варианта взаимодействия человека с СЦ можно привести пример организации производства в ряде китайских компаний, в которых эргатическую систему гибрида «Человек-Компьютер» довели до непрерывного непосредственного взаимодействия между собой, используя сенсоры мозговой активности с искусственным интеллектом, подключенные к системе производственного контроля [20]. В этой связи актуализируются социогуманитарные аспекты развития СЦ

В общем случае важно отметить, что ситуационное проектирование сценариев течения процессов в СЦ должно происходить непрерывно, обеспечивая их высокую эффективность.

СЦ станут эффективным инструментом работы руководителя, если они гармонично сочетают в себе:

- постоянно обновляемые инженерно-технические решения, обеспечивающие непрерывную модернизацию технологий;
- базы данных и программные продукты, обеспечивающие необходимый уровень актуализированной в каждый момент времени информации;
- интеллектуальную команду управления, владеющую необходимыми компетенциями в области управления и эффективно использующие организационно-технические средства управления.

Все перечисленные компоненты СЦ равнозначны и важны.

В такой модели для территориальной сетевой системы управления социально-экономическими системами системообразующие компоненты можно выстроить в следующей иерархической последовательности СЦ: «Гражданин», «Социальная группа», «Муниципалитет», «Регион», «Субрегион (федеральный округ)», «Правительство России», «Администрация Президента». В отраслевом разрезе сетевая система управления складывается из СЦ: «Самозанятый специалист», «Индивидуальный предприниматель», «Предприятие», «Холдинг», «Кластер», «Отрасль». Такие эргатические системы, раскинутые по всей территории страны, в конечном итоге должны включаться в единую распределенную сеть стратегического, тактического и оперативного планирования, мониторинга, контроля и управления.

Исследования и разработки последних лет свидетельствуют о том, что приближается время включения каждого человека, от принятия решения которым зависит

<sup>1</sup> Термин «эргатическая система» был принят на I-ом конгрессе Международной федерации по автоматическому управлению, прошедшем в 1960 году в МГУ, для обозначения систем, включающих человека, функционирующего с комплексом технических средств. См: <https://www.ifac-control.org/about/the-ifac-story/view>.



устойчивость работы той или иной «ячейки» сети, на правах СЦ в качестве важного элемента СРСЦ. Таким образом, в пределах СРСЦ можно рассматривать в виде эргатической фрактальной сетевой системы управления социально-экономическими системами, в котором каждый человек может иметь персональный СЦ.

#### **Новые подходы в развитии СЦ**

Эргатические СЦ способны быстро реагировать на возникающие вызовы, взвешенно оценивать сложившуюся ситуацию, оценивать риски, принимать решения в нестандартных ситуациях с нечеткой логикой, непрерывно развиваться. Однако для широкого распространения СЦ необходимо решение ряда задач, требующих применения новых подходов в проектировании СЦ, связанных не только с ускорением обработки информации и передачи данных, но и с применением модели организаций, позволяющей транслировать структуры данных. В этом плане, несмотря на большое количество исследований в данной области, методы обработки информации в СЦ с использованием моделей организаций для задач управления в социальных и экономических системах недостаточно развиты. До сих пор не удавалось создать модель организации, которая отражала бы все типовые характеристики организаций, но при этом позволяла учитывать специфику каждой организации.

В последнее десятилетие акцент в обсуждении проблем и перспектив развития СЦ представителями профессионального ИТ-сообщества, органов государственной власти и бизнеса перешел на необходимость создания в Российской Федерации СРСЦ с переходом на отечественные информационные и аналитические системы в целях обеспечения независимости от импортной продукции. Развитие цифровой экономики потребовали по – новому взглянуть на СЦ и СРСЦ как на платформы для гибкого стратегического планирования и инструмент ситуативного управления в социальных и экономических системах. Связанное с этим расширение сферы применения СЦ требует развития новых подходов к созданию СЦ, методов и алгоритмов синтеза моделей организаций как объектов управления и по другим основаниям: особенность СЦ и СРСЦ проявляется в активном влиянии управляемой системы на процесс управления.

Самой трудоемкой частью создания СЦ является создание модели, которая бы давала целостную картину организации и снимала противоречие между возрастающей сложностью управленческих задач и ограниченными возможностями существующих частных (одноаспектных) моделей СЦ. Такая модель должна позволять копирование,

инкорпорацию в результирующие модели, базы данных и знаний, в программные продукты математическое, информационное и программное обеспечение в условиях конкретного проекта СЦ. Основная масса моделей строится на основе выявления частных описаний свойств организаций, в то время как для создания СЦ и управления на основе СЦ требуется целостный взгляд на управляемый объект. Недостаточность теории заключается в частичном описании организации в рамках различных подходов и отсутствии объединяющего способа описания. Поэтому необходимо создание концепции универсальной модели организации.

#### **Концепция универсальной модели организации**

В 1877 году К.Мебиус ввел понятие «ценоз» для исследования свойств совокупностей живых организмов – биоценозов [21]. Биоценоз Мёбиуса можно рассматривать как подвижно-равновесную развивающуюся систему взаимодействующих организмов. Через столетие, в 1978 году Б.И.Кудрин, основываясь на общих принципах развития кибернетики и системных исследований, распространил этот подход на технические системы, показав эквивалентность построения технических и информационных систем биологическим системам [15]. По аналогии с биоценозом он ввел понятие техноценоза - ограниченного в пространстве и времени любого выделенного единства, включающего сообщество изделий. Далее понятие техноценоза было развито его учеником – профессором В.И.Гнатюком: техноценоз как сообщество изделий характеризующееся слабыми связями и слабым взаимодействием [16].

Очевидно, переход от техноценоза к управлению в социальных и экономических системах представляет собой качественный скачок в развитии, так как последнее предполагает кроме техноценоза, социоценоз, эконоценоз и др. формы и виды ограниченных в пространстве и времени сообществ особей с разной степени силы связями и взаимодействиями. Следует отметить, что переход от техноценоза к социоценозу сложен по той принципиальной причине, что проявления синергетики в технических и социально-экономических системах на современном этапе развития человечества различаются существенно. Если в технических системах она проявляется в редких случаях, то в социально-экономических системах синергетика является одним из интереснейших моментов развития. Самоорганизация в такой сложной системе как социоценоз свидетельствует о невозможности установления жесткого контроля и управления над ней, самоорганизующейся системе невозможно постоянно детерминировать путь развития, так

как они имеют спектр различных путей развития, выбор конкретного из них определяется самой системой. Поэтому управление социальными и экономическими системами предполагает рассмотрение таких систем в контексте собственных тенденций развития той или иной системы, с учетом присущих ей элементов саморегуляции. В равновесном или квазиравновесном состоянии для социально-экономических систем существует только одно стационарное состояние, зависящее от управляющих параметров, изменение которых выводит систему из равновесного состояния, в

предельном случае изменения достигая точки бифуркации, за которым невозможно предсказать поведение системы.

Для того чтобы создать модель, которая бы давала целостную картину организации в социально-экономической системе, выберем с использованием понятийного аппарата техноценоза в качестве ключевого конструкта понятие ресурса. В таком случае укрупненную картину взаимодействия СЦ организации с внешней средой можно представить в виде схемы, представленной на рисунке 1.

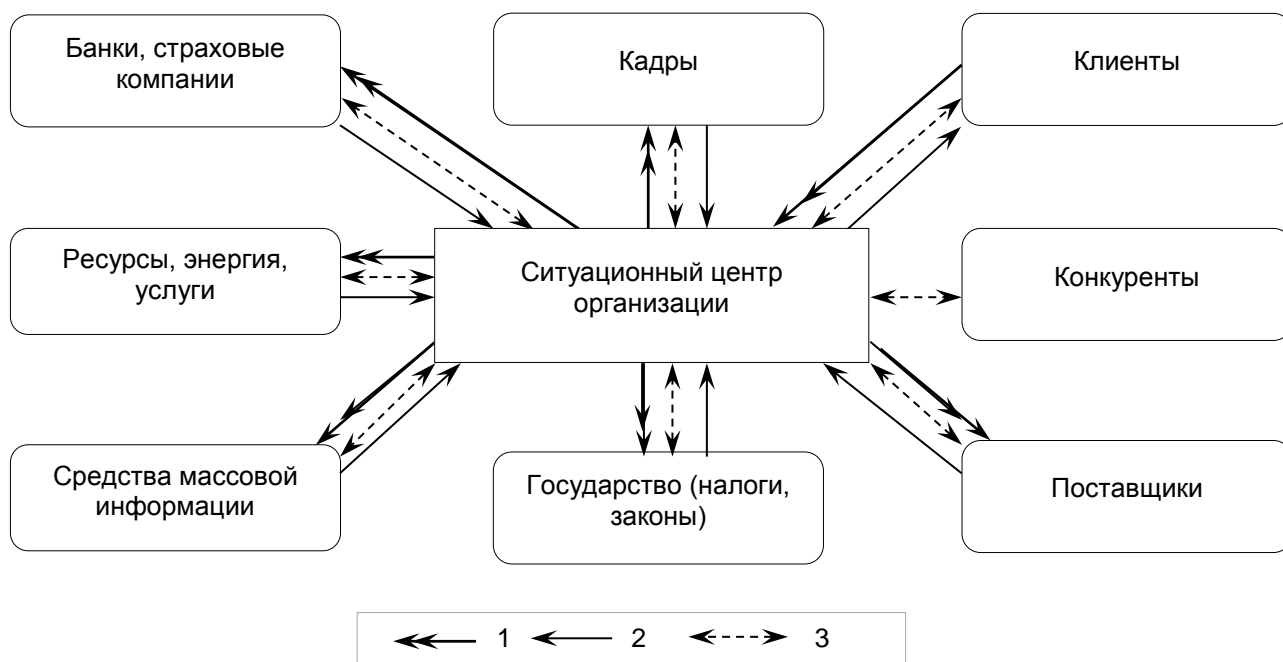


Рис. 1. Схема взаимодействия СЦ с внешней средой.

1-финансы (Fn), 2-ресурсы (MR), 3 – информация (I)

В результате использования принципа самопостроения в социальных системах самовоспроизводятся **инвариантные** свойства организации: 1) целостность, 2) системная дифференциация, 3) открытость организации, 4) редукция комплексности, 5) операционная

замкнутость, 6) самореференция, 7) коммуникация и 8) смысл.

Свойства целостности, системной дифференциации и открытости организации (свойства 1–3) формализуются формулой баланса ресурсов (уравнение 1):

$$\sum_{tik} (R_{ik}^t + D_{ik}^t) * C_{R_{ik}^t} = \sum_{tik} (r_{ik}^t + K_{ik}^t) * C_{r_{ik}^t} \quad (1)$$

где  $R$  – количество ресурса, входящего в организацию;  $r$  – количество ресурса, исходящего из организации;  $C_R$  – стоимость входящего ресурса;  $r$  – продажная стоимость исходящего ресурса;  $t$  – момент времени;  $i$  – индекс ресурса;  $k$  – индекс внешней

организации;  $D_{ik}^t$  – долг поставщика ресурса;  $K_{ik}^t$  – долг организации перед получателем.

Выделяются финансовые (Fn), информационные (I) и материальные ресурсы (MR), рисунок 1. В качестве MR может быть: персонал (P), техническое устройство (T),

программный сервис (S), другие материальные объекты (M) или любая их комбинация.

Свойство редукции сложности (свойство 4,) достигается типизированием внешних организаций и потоков ресурсов (рис. 1).

Свойство операционной замкнутости (свойство 5) обеспечивается единой системой управления ресурсами, попадающими в организацию. Структура системы управления описана моделью жизнеспособной системы (рисунок 2), параметры и номенклатура ресурса – моделью техноценоза.

Выразив свойства функциональных элементов (F) в виде одного из любых семи типов комбинаций: P, T, S – [P, T, S, P+T, P+S,

T+S, P+T+S] в техноценологической модели можно получить, с одной стороны, ресурсное описание социально-экономической организации, а с другой стороны, - путь к параметрической и номенклатурной оптимизации. Организация оптимальна по номенклатуре и параметрам, если имеется такой набор персонала, технических устройств и программных сервисов и любых их комбинаций, которые по своим совокупным функциональным показателям обеспечивают выполнение поставленных задач, а с другой - суммарные энергетические ресурсы, воплощенные в персонале при обучении и технических устройствах и программных сервисах при изготовлении, распределены равномерно по популяциям видов P,T,S и P.

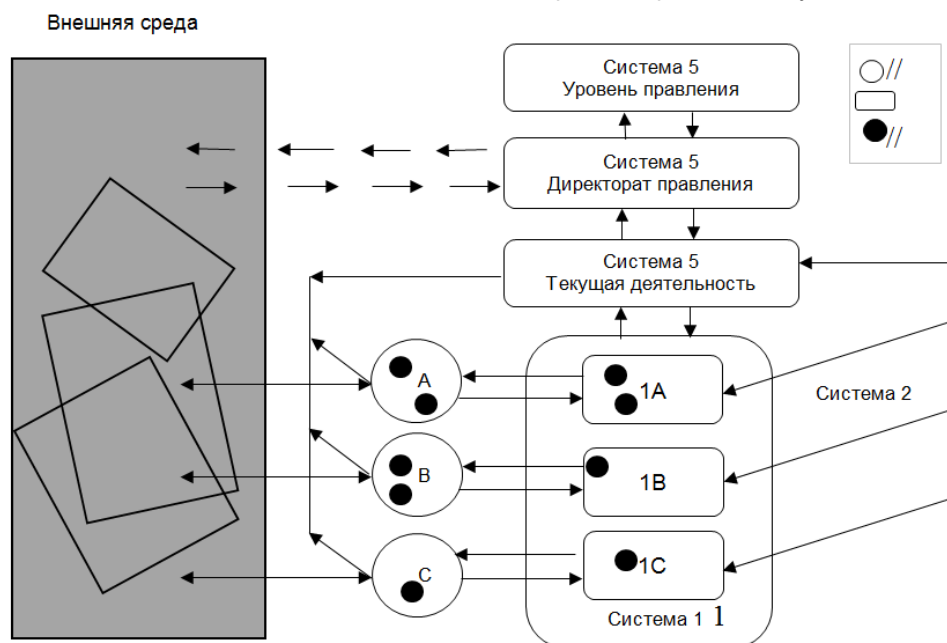


Рис. 2. Структура модели жизнеспособной системы:

A, B, C - кластеры (подразделения предприятия, организации); 1A, 1B, 1C - система 1 (руководители кластеров); система 2 - система регулирования кластеров; 1-кластеры; II - функциональные элементы (F), представленные любой комбинацией персонала (P), технических устройств (T), программных сервисов (S).

С учетом принятых допущений свяжем между собой суммарный параметрический ресурс всех видов F с одной стороны, и произведение общего количества видов V) в

организации на суммарный параметрический ресурс, выделенный на каждый вид, с другой стороны (уравнение 2):

$$\sum_{k,j=1}^{k=7, j=\infty} \left( \int_0^{\infty} F_j^k(x) dx \right) = \sum_{k=1}^{k=7} \left( \int_0^{\infty} V^k(y) dy * \sum_{j=1}^{\infty} \left( \int_{r_{ji}^k}^{r_{ji}^k+1} F_j^k(x) dx \right) \right) = F_{\Sigma} = \text{const} \quad (2),$$

где:  $F_j^k(r)$  - ранговое параметрическое распределение функциональных элементов k-го типа, по j-му параметру;  $V^k(y)$ -видовое распределение функциональных элементов k-го типа,  $r_{ji}^k$  – параметрический ранг k-го типа, i-го вида по j-му параметру, x и y – непрерывные

аналоги ранга,  $F_{\Sigma}$ - суммарный параметрический ресурс ( $F_{\Sigma i}$  – для i-го вида)

Третье уравнение является следствием закона сохранения энергии в параметрической форме:

$$\sum_{k,j=1}^{k=7,j=\infty} \left( \int_{r_j^k}^{r_{j+1}^k} \omega_j^k(x) dx \right) = \sum_{k,j=1}^{k=7,j=\infty} \left( \int_{r_j^k}^{r_{j+1}^k} \mu_j^k(x) dx \right) = \frac{F_{\Sigma i}}{2} = const; \tag{3}$$

где левая часть имеет смысл полезного эффекта, а правая часть затрат.  $\omega_j^k(r)$  - ранговое параметрическое распределение функциональных элементов k-го типа по j-му параметру, имеющему смысл полезного эффекта (видообразующему),  $\mu_j^k(r)$  - ранговое параметрическое распределение функциональных элементов k-го типа по j-му параметру, имеющему смысл энергетических затрат (функциональному)

В четвертом уравнении отражена обратная связь между численностью функциональных элементов любого вида k-го типа (мощностью популяции)  $\Lambda(r_{Bi}^k)$  и уровнем овеществленного в выбранном типе функционального элемента для данного видообразующего параметра (математического ожидания)

$$\int_{r_{ji}^k}^{r_{j+1}^k} F_j^k(x) dx = \Lambda(r_{Bi}^k) \cdot M[F_j^k(r_{ji}^k)] = F_{\Sigma j}^k = const; \tag{4}$$

где  $r_{Bi}^k$  - видовой ранг k-го функционального элемента i-го вида,  $\Lambda(r_{Bi}^k)$  - ранговое видовое распределение k-го функционального элемента,  $\Lambda(r_{Bi}^k)$  - количество функциональных элементов k-го типа, особой i-го вида в организации (мощность популяции),  $M[F_j^k(r_{ji}^k)]$  - математическое ожидание значения j-го

параметра для функциональных элементов k-го типа, i-го вида.

Пятое уравнение устанавливает связь между параметрическим  $r_{ji}^k$  и видовым  $r_{Bi}^k$  рангами техноценоза для функциональных элементов k-го типа через его ранговое видовое распределение  $\Lambda(x)$

$$r_{ji}^k = \int_{r_{Bi}^k}^{\infty} \Lambda(x) dx; \tag{5}$$

Шестое уравнение (а также первое и третье и седьмое) являются следствием действия закона сохранения энергии. Шестое уравнение указывает на параметрически-энергетическую

связанность (между континуумами параметров  $\omega_j^k$  и  $\mu_j^k$ ) функциональных элементов k-го типа,

$$\sum_{k,j=1}^{k=7,j=\infty} \left( \int_0^{\infty} \omega_j^k(x) dx - \int_0^{\infty} \mu_j^k(x) dx \right) = 0; \tag{6}$$

Седьмое уравнение показывает, что суммарный параметрический ресурс техноценоза

исчерпывается только в том случае, если рассмотрен весь континуум видообразующих и функциональных параметров.

$$\left( \sum_{k,j=1}^{k=7,j=\infty} \left( \int_0^{\infty} F_j^k(x) dx \right) \right)$$

$$\sum_{k,j=1}^{k=7,j=\infty} \left( \int_0^{\infty} \omega_j^k(x) dx + \int_0^{\infty} \mu_j^k(x) dx \right) = \sum_{k,j=1}^{k=7,j=\infty} \left( \int_0^{\infty} F_j^k(x) dx \right); \tag{7}$$

Свойство самореференции (свойство 6), т.е. обязательного самосогласования частей организации, реализуется в плагиновой архитектуре СЦ. Свойство коммуникации (свойство 7) обеспечивается наличием в СЦ возможности получать и выдавать информацию

в режимах онлайн, офлайн и ручной ввод. Свойство смысла (свойство 8) – совокупность внутриорганизационных положений и инструкций, традиций, ценностей, личных связей и эмоций людей, других формализуемых и неформализуемых особенностей, которые

могут либо повышать, либо снижать жизнеспособность организации.

Рассмотрим, например, простую расчетную операцию расчета капитала организации, на

основе использование уравнения баланса ресурсов (уравнение 1). С учетом этого уравнения состав выпускаемого ресурса можно будет определить по формуле:

$$r_i^t = \sum_{tikl} R_{iklmn}^t \beta_{R_i r_i}^t \tag{8}$$

Где  $\beta_{R_i r_i}^t$  коэффициент, определяющий долю, вошедшего ресурса и использованного в производстве данного товара. В данной формуле учитывается конечный результат,

даже если технологический процесс был многостадийным.

Себестоимость выпускаемого ресурса определится соответственно по формуле себестоимость ресурса:

$$V_{r_i}^t = \sum_{tikl} C_{R_{iklmn}^t} \beta_{R_i r_i}^t \tag{9}$$

где  $V_{r_i}^t$  - себестоимость выпускаемого ресурса.

Продажная цена ресурса имеет вид:

$$C_{r_i}^t = \sum_{tikl} C_{R_i^t} \beta_{R_i r_i}^t \alpha_{R_i r_i}^t \tag{10}$$

где  $\alpha_{R_i r_i}^t$  коэффициент наценки на каждую составляющий ресурс, входящий в состав выпускаемого продукта. Если процесс производства ресурса был многостадийным, то коэффициент определяется путем сумми-

рования всех стадий. За счет коэффициента наценки на предприятии остается часть ресурса, которая и будет его капиталом.

Капитал в математическом выражении будет выглядеть следующим образом:

$$\sum_{tikl} S_{iklmn}^t C_{s_{iklmn}^t} = \sum_{tikl} R_{iklmn}^t C_{R_{iklmn}^t} - \sum_{tikl} \left( \left( \sum_{tikl} R_{iklmn}^t \beta_{R_i r_i}^t \right) * \left( \sum_{tikl} C_{R_i^t} \beta_{R_i r_i}^t \right) \right) \tag{11}$$

или можно переписать в виде:

$$\sum_{tikl} S_{iklmn}^t C_{s_{iklmn}^t} = \sum_{tikl} \left( \left( \sum_{tikl} R_{iklmn}^t \beta_{R_i r_i}^t \right) * \left( \sum_{tikl} C_{R_i^t} \beta_{R_i r_i}^t \right) \right) - \left( \sum_{tikl} \left( \left( \sum_{tikl} R_{iklmn}^t \beta_{R_i r_i}^t \right) * \left( \sum_{tikl} C_{R_i^t} \beta_{R_i r_i}^t \right) \right) \right) \tag{12}$$

где  $\sum_{tikl} S_{iklmn}^t C_{s_{iklmn}^t}$  - капитал  
 $S$  - остаток ресурса;  
 $C_S$  - себестоимость ресурса;

Он включает в себя сырье, незавершенное производство, готовую продукцию. Здесь

необходимо отметить, что формулы (1- 11) написаны для внешних контрагентов организации. Уравнение (1) позволяет в каждый момент времени контролировать фактическое состояние прихода и расхода любого вида ресурса в организации. Постоянное наличие баланса ресурсов обеспечивает адекватность и корректность дальнейших расчетов в рамках принятых допущений.

Технологии синтеза виртуальной рабочей среды для гетерогенных территориально-распределенных коллективов, создания СРСЦ как инструмента устойчивого развития территорий и сложных объектов представлены в работах [24-26].

### Заключение

Расширение информационных технологий в управлении социальными и экономическими системами связано с созданием информационной инфраструктуры, представляющей собой одну из базовых направлений цифровой экономики. Информационная инфраструктура включает систему организационных структур и систему информационного взаимодействия, обеспечивающие реализацию технологий подготовки принятия решений с помощью важного инструмента управления организацией - СЦ. Динамика изменения состояния ресурсов организации, пространства и времени в турбулентной экономике представляю собой сложную картину со многими неизвестными. Поэтому СРСЦ позволяют повысить устойчивость функционирования и развития организации.

Уравнения (2-7) показывают возможность оптимального построения организации с ресурсной точки зрения в каждый момент времени. Выделяя финансовые, информационные и материальные ресурсы (рисунок 1) следует особое внимание обратить на персонал – человеческие ресурсы, так как этот вид ресурса приобретает особое значение в социально-экономических системах, играя ведущую роль в самоорганизации и саморегуляции социально-экономических систем.

Рассмотренный концептуальный подход к созданию универсальной модели организации, обеспечивающий самовоспроизводство инвариантных свойств организации в едином концепте технетики, теории жизнеспособных целостных систем и инвариантности позволяет существенно ускорить процесс создания СЦ, моделирование социальных, экономических и

экологических процессов. При комплексном моделировании объектами рассмотрения являются как модели самих субъектов и объектов, так и рассматриваемая ситуация в динамике, участниками которой они являются, а также метамодели. Процесс моделирования объектов исследования интерпретируется как процесс управления развивающейся ситуацией в условиях неопределённости

В рассматриваемых в литературе СРСЦ передача данных от источников информации в СРСЦ происходит в ручном и полуавтоматизированном режиме, затем обеспечивается их интеграция, нормализация данных, обработка и дальнейшая трансляция обработанной информации и рекомендаций к лицам, принимающим решение (ЛПР) и другим потребителям информации в автоматизированном и автоматическом режиме. При этом данные передаются в виде файлов, на бумажных носителях, либо в виде голосовых сообщений. Принципиальным отличием рассмотренного концептуального подхода является возможность трансляции не просто данных, а структуры данных, что позволяет существенно упростить формирование СЦ.

В работе [27] рассмотрена проблема совершенствования системы государственного управления с использованием СРСЦ России на основе саморазвивающихся полисубъектных сред и современных представлений систем управления, кибернетики и цифровой экономики. Авторами этой работы показано объективная закономерность эволюции СЦ в Центры развития, функции которых существенно должны расширяться по сравнению с сегодняшним представлением СЦ как центров поддержки управленческих решений.

Рассмотренная универсальная модель организации в едином концепте технетики, теории жизнеспособных целостных систем и инвариантности, открывает возможность существенного ускорения процессов создания СЦ, обеспечивая самовоспроизводство инвариантных свойств организаций: целостность, системная дифференциация, открытость организации, редукция сложности, операционная замкнутость, самореференция, коммуникация и смысл. Предлагаемая универсальная модель организации является новым инструментом в проектировании СЦ для управления социально-экономическими системами в цифровой экономике, создавая предпосылки для ускорения перерастания СЦ в Центры развития.

### Литература

1. Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642. О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/41449> (дата обращения 10.05.2018).

2. Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017 г. № 203 "О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 - 2030 годы" // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102431687> (дата обращения 10.05.2018).

3. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года. Утвержден 12.11.2016 г. Председателем Правительства Российской Федерации Д.А. Медведевым // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://static.government.ru/media/files/41d4b737638b91da2184.pdf> (дата обращения 10.05.2018).

4. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации». Утверждена Распоряжением Правительства РФ от 28.07.2017 года №1632-р // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf> (дата обращения 10.05.2018).

5. Постановление Правительства РФ от 28.08.2017 г. № 1030 «О системе управления реализацией программы «Цифровая экономика Российской Федерации» // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://static.government.ru/media/files/zutOPH6TyKz2ciJAFcn74orvpb89UCMa.pdf> (дата обращения 10.05.2018).

6. «Всероссийский форум «Система распределенных ситуационных центров как основа цифровой трансформации государственного управления» // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://spbu.ru/news-events/calendar/sistema-raspredeleennyh-situacionnyh-centrov-kak-osnova-cifrovoy-transformacii> (дата обращения 10.05.2018).

7. Ситуационное управление – ключ к принятию взвешенных решений // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://ситцентр.рф/> (дата обращения 10.05.2018).

8. Зацаринный А.А., Шабанов А.П. Технология информационной поддержки деятельности организационных систем на основе ситуационных центров. М.: Торус Пресс, 2015. 232 с.

9. Распределенная система ситуационных центров развития для поддержки информационно-аналитической работы на пространстве большой Евразии / А.А. Зацаринный, К.К. Колин, Н.И. Ильин и др. // Аналитика развития, безопасности и сотрудничества: Большая Евразия. Материалы IV Межд. научно-практ. конф. М., 2017. С. 74-78.

10. Зацаринный А.А., Колин К.К. Методологические основы системного подхода к созданию информационных систем в условиях глобализации общества // Стратегические приоритеты. 2018. Т. 17. № 1. С. 38-61.

11. Система распределенных ситуационных центров развития / А.А. Зацаринный, К.К. Колин, Н.И. Ильин и др. // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2017. Материалы Десятой международной конференции: в 2-х томах. ИПУ им. В.А.Трапезникова Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. М., 2017. С. 70-73.

12. Зацаринный А.А., Киселев Э.В. Некоторые подходы к формированию нормативно-технической базы в части требований к архитектурному построению информационных систем организаций – участников единого информационного пространства России // Системы и средства информатики. 2015. Т. 25. № 3. С. 179-194.

13. Зацаринный А.А., Козлов С.В., Сучков А.П. Система поддержки принятия решений как компонент перспективной автоматизированной системы управления // Качество и жизнь. 2016. Т. Специальный выпуск. С. 23-27.

14. Шабанов А.П. Технология информационной поддержки аналитических структур ситуационных центров государственных организаций // Информационные войны. 2017. Т. 41. № 1. С. 33-38.

15. Интеллектуальная система поддержки принятия решений для администраций муниципальных образований России (концептуальная модель). Государство и бизнес / А.С. Горшков, И.Ю. Краснянский, А.А. Меркулов, А.Я. Яфасов // Материалы II Международной конференции Государство и бизнес. Вопросы теории и практики: моделирование, менеджмент, финансы. СПб, 2011. С. 8-22.

16. Универсальный виртуальный ситуационный центр «Муниципалитет» / А.А. Меркулов, А.Я. Яфасов, И.Л. Кошелева, Е.В. Петренко. Свидетельство № 2013661281 от 05.12.2013.

17. Von Weizsäcker E.U., Wijkman A. 2018. Come On! Capitalism, Short-termism, Population and the Destruction of the Planet. N.Y.: Springer Science+Business Media LLC. 232 с.

18. Зацаринный А.А., Шабанов А.П. Эффективность ситуационных центров и человеческий фактор. Вестник Московского университета имени С. Ю. Витте. Серия 1: Экономика и управление. 2013. Т. 5. №3. С. 43-53.

19. Яницкий О. Н. Новый доклад Римскому клубу к 50-летию его основания: плюсы и минусы // Власть. 2018. Т. 26. № 2. С. 19-25.

20. Stephen Chen. Forget the Facebook leak: China is mining data directly from workers brains on an industrial scale // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://www.scmp.com/news/china/society/article/2143899/forget-facebook-leak-china-mining-data-directly-workers-brains> (дата обращения: 10.05.2018).

21. K. A. Möbius Die Auster und die Austerwirtschaft. Berlin: Verlag von Wiegandt, Hemple & Parey, 1877. 126 с.

22. Кудрин Б.И. Системный анализ техноценозов. Электрификация металлургических предприятий Сибири. Томск: Изд-во ТГУ, 1978. С.125-165.

23. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов. Томск: Изд-во ТГУ – Центр системных исследований, 2005. 384 с.

24. Майтаков Ф.Г., Меркулов А.А., Петренко Е.В., Яфасов А.Я. Технология создания системы распределенных ситуационных центров. МИТ, 4(38) Т.2, 2017 с.159-167.

25. Кострикова Н.А., Меркулов А.А., Яфасов А.Я. Технология синтеза распределенных интеллектуальных систем управления как инструмент устойчивого развития территорий и сложных объектов. МИТ, 1(37) Т.1, 2017 с.135-141.



26. Майтаков Ф.Г., Меркулов А.А., Петренко Е.В., Яфасов А.Я. Технология синтеза виртуальной рабочей среды для гетерогенных территориально-распределенных коллективов. Вестник РГРТУ, 2017, №4, вып.62, с.95-103.

27. Авдеева З.К., Барышников П.Ю., Бауэр В.П., Зацаринный А.А. и др. Социогуманитарные аспекты ситуационных центров развития / под редакцией В.Е.Лепского и А.Н.Райкова. М.: ФГБУН ИФ РАН, 2017. 416 с.

#### References

1. Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 01.12.2016 g. № 642. O Strategii nauchno-tehnologicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii. Elektron. dan. Rezhim dostupa URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/41449> (data obrashcheniya 10.05.2018).

2. Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 09.05.2017 g. № 203 O Strategii razvitiya informacionnogo obshchestva v Rossijskoj Federacii na 2017-2030 gody. Elektron. dan. Rezhim dostupa URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102431687> (data obrashcheniya 10.05.2018).

3. Prognoz nauchno-tehnologicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda. Utverzhden 12.11.2016 g. Predsedatelem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii D.A. Medvedevym. Elektron. dan. Rezhim dostupa URL: <http://static.government.ru/media/files/41d4b737638b91da2184.pdf> (data obrashcheniya 10.05.2018).

4. Programma «Cifrovaya ekonomika Rossijskoj Federacii». Utverzhdena Rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 28.07.2017 goda №1632-r. Elektron. dan. Rezhim dostupa URL: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB7915v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf> (data obrashcheniya 10.05.2018).

5. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 28.08.2017 g. № 1030 «O sisteme upravleniya realizaciej programmy «Cifrovaya ekonomika Rossijskoj Federacii». Elektron. dan. Rezhim dostupa URL: <http://static.government.ru/media/files/zutOPH6TyKz2ciJAFcn74orvpb89UCMa.pdf> (data obrashcheniya 10.05.2018).

6. «Vserossijskij forum «Sistema raspredelennyh situacionnyh centrov kak osnova cifrovoj transformacii gosudarstvennogo upravleniya». Elektron. dan. Rezhim dostupa URL: <https://spbu.ru/news-events/calendar/sistema-raspredelennyh-situacionnyh-centrov-kak-osnova-cifrovoy-transformacii> (data obrashcheniya 10.05.2018).

7. Situacionnoe upravlenie – klyuch k prinyatiyu vzveshennyh reshenij. Elektron. dan. Rezhim dostupa URL: <http://sitcentr.rf/> (data obrashcheniya 10.05.2018).

8. Zacarinnij A.A., Shabanov A.P. Tekhnologiya informacionnoj podderzhki deyatel'nosti organizacionnyh sistem na osnove situacionnyh centrov. M.: Torus Press, 2015. 232 p.

9. Raspredelennaya sistema situacionnyh centrov razvitiya dlya podderzhki informacionno-analiticheskoy raboty na prostranstve bol'shoj Evrazii. A.A. Zacarinnij, K.K. Kolin, N.I. Il'in i dr. Analitika razvitiya, bezopasnosti i sotrudnichestva: Bol'shaya Evraziya. Materialy IV Mezhd. nauchno-prakt. konf. M., 2017. Pp. 74-78.

10. Zacarinnij A.A., Kolin K.K. Metodologicheskie osnovy sistemnogo podhoda k sozdaniyu informacionnyh sistem v usloviyah globalizacii obshchestva. Strategicheskie priority. 2018. T. 17. № 1. Pp. 38-61.

11. Sistema raspredelennyh situacionnyh centrov razvitiya / A.A. Zacarinnij, K.K. Kolin, N.I. Il'in i dr. Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnyh sistem MLS D\2017. Materialy Desyatoj mezhdunarodnoj konferencii: v 2-h tomah. IPU im. V.A. Trapeznikova Pod obshchej redakciej S.N. Vasil'eva, A.D. Cvirikuna. M., 2017. Pp. 70-73.

12. Zacarinnij A.A., Kiselev E.V. Nekotorye podhody k formirovaniyu normativno-tehnicheskoy bazy v chasti trebovanij k arhitekturnomu postroeniyu informacionnyh sistem organizacij – uchastnikov edinogo informacionnogo prostranstva Rossii. Sistemy i sredstva informatiki. 2015. T. 25. № 3. Pp. 179-194.

13. Zacarinnij A.A., Kozlov S.V., Suchkov A.P. Sistema podderzhki prinyatiya reshenij kak komponent perspektivnoj avtomatizirovannoj sistemy upravleniya. Kachestvo i zhizn'. 2016. T. Special'nyj vypusk. Pp. 23-27.

14. Shabanov A.P. Tekhnologiya informacionnoj podderzhki analiticheskikh struktur situacionnyh centrov gosudarstvennyh organizacij. Informacionnye vojny. 2017. T. 41. № 1. Pp. 33-38.

15. Intellektual'naya sistema podderzhki prinyatiya reshenij dlya administracij municipal'nyh obrazovanij Rossii (konceptual'naya model'). Gosudarstvo i biznes. A.S. Gorshkov, I.Yu. Krasnyanskij, A.A. Merkulov, A.Ya. Yafasov. Materialy II Mezhdunarodnoj konferencii Gosudarstvo i biznes. Voprosy teorii i praktiki: modelirovanie, menedzhment, finansy. SPb, 2011. Pp. 8-22.

16. Universal'nyj virtual'nyj situacionnyj centr «Municipalitet» / A.A. Merkulov, A.Ya. Yafasov, I.L. Kosheleva, E.V. Petrenko. Svidetel'stvo № 2013661281 ot 05.12.2013.

17. Von Weizsäcker E.U., Wijkman A. 2018. Come On! Capitalism, Short-termism, Population and the Destruction of the Planet. N.Y.: Springer Science+Business Media LLC. 232 p.

18. Zacarinnij A.A., Shabanov A.P. Effektivnost' situacionnyh centrov i chelovecheskij faktor. Vestnik Moskovskogo universiteta imeni S. Yu. Vitte. Seriya 1: Ekonomika i upravlenie. 2013. T. 5. №3. Pp. 43-53.

19. Yanickij O. N. Novyj doklad Rimskomu klubu k 50-letiyu ego osnovaniya: plyusy i minusy. Vlast'. 2018. T. 26. № 2. C. 19-25.

20. Stephen Chen. Forget the Facebook leak: China is mining data directly from workers brains on an industrial scale. Elektron. dan. Rezhim dostupa URL: <http://www.scmp.com/news/china/society/article/2143899/forget-facebook-leak-china-mining-data-directly-workers-brains> (data obrashcheniya: 10.05.2018).

21. K. A. Möbius Die Auster und die Austernwirthschaft. Berlin: Verlag von Wiegandt, Hemple & Parey, 1877. 126 p.

22. Kudrin B.I. Sistemnyj analiz tekhnocenzov. Elektrifikaciya metallurgicheskikh predpriyatij Sibiri. Tomsk: Izd-vo TGU, 1978. Pp.125-165.

23. Gnatyuk V.I. Zakon optimal'nogo postroeniya tekhnocenzov. Tomsk: Izd-vo TGU – Centr sistemnyh issledovanij, 2005. 384 p.

24. Majtakov F.G., Merkulov A.A., Petrenko E.V., Yafasov A.Ya. Tekhnologiya sozdaniya sistemy raspredelennyh situacionnyh centrov. MIT, 4(38) T.2, 2017 p.159-167.

25. Kostrikova N.A., Merkulov A.A., Yafasov A.Ya. Tekhnologiya sinteza raspredelennyh intellektual'nyh sistem upravleniya kak instrument ustojchivogo razvitiya territorij i slozhnyh ob"ektov. MIT, 1(37) T.1, 2017. p.135-141.

26. Majtakov F.G., Merkulov A.A., Petrenko E.V., Yafasov A.Ya. Tekhnologiya sinteza virtual'noj rabochej sredy dlya geterogennyh territorial'no-raspredelennyh kollektivov. Vestnik RGRTU, 2017, №4, vyp.62, p.95-103.

27. Avdeeva Z.K., Baryshnikov P.Yu., Bauer V.P., Zacarinnij A.A. i dr. Sociogumanitarnye aspekty situacionnyh centrov razvitiya. pod redakciej V.E.Lepkogo i A.N.Rajkova. M.: FGBUN IF RAN, 2017. 416 p.

УДК 656.073

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ КАБОТАЖНЫХ ГРУЗОВЫХ МОРСКИХ ПЕРЕВОЗОК

**Александр Аркадьевич Исаев**

доктор экономических наук, профессор кафедры международного маркетинга и торговли  
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса  
690014, Владивосток, ул. Гоголя, 41  
e-mail: isaevalex@list.ru

**Екатерина Сергеевна Мегей**

аспирант, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского  
690003, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а  
e-mail: goldfish-knr@mail.ru

### Аннотация

Констатируется отсутствие среди ученых и специалистов общепризнанных методик оценки конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок. По мнению авторов, одним из наиболее перспективных методов оценки конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок является коммуникативный метод, основанный на эмоциональной теории продаж. Речь идет о теории выбора наиболее привлекательного товара в условиях рыночной конкуренции. Согласно эмоциональной теории продаж, на выбор того или иного товара оказывают влияние не только характеристики основного продукта, но и характеристики так называемых «дополнительных продуктов» деятельности производителя (речь о таких видах деятельности как послепродажная, рекламная, связанная с решением социальных проблем и т.д.). Таким образом, речь идет о приобретении группы продуктов деятельности производителя, так называемого интегрированного продукта. Разработанная авторами методика оценки конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок состоит из четырех этапов: 1) расчет показателя потребительной значимости данной каботажной грузовой морской перевозки как интегрированного продукта; 2) расчет показателя потребительной привлекательности данной каботажной грузовой морской перевозки как интегрированного продукта; 3) расчет показателей потребительной значимости и потребительной привлекательности конкурирующих «интегрированных продуктов»; 4) расчет показателя конкурентоспособности данной каботажной грузовой морской перевозки как соотношения потребительной привлекательности данного «интегрированного продукта» и максимальной потребительной привлекательности конкурирующих интегрированных продуктов.

Ключевые слова: морские перевозки, эмоциональная теория продаж, система обеспечения конкурентоспособности морских перевозок на предприятии

## METHOD OF ASSESSING THE COMPETITIVENESS OF CABOTAGE CARGO MARITIME TRANSPORT

**Alexander A. Isaev**

the professor, Dr. Sci. Econ.,  
the professor of department of international marketing and trade  
Vladivostok state university of economics and service  
Gogolya, 41, Vladivostok 690014, Russian Federation  
e-mail: isaevalex@list.ru

**Ekaterina S. Megey**

the post-graduate student  
Maritime State University named after Adm. G.I. Nevelskoy  
Verkhneportovaya, 50a, Vladivostok 690003, Russian Federation  
e-mail: goldfish-knr@mail.ru

### Abstract

There is no consensus between scientifically men and specialists of universally recognized methods of assessing the competitiveness of cabotage cargo maritime transport. According to the authors, one of the best methods of assessing the competitiveness of cabotage cargo maritime transport is a communicative method based on the emotional theory of sales. We are talking about the theory of choosing the most attractive product in a market competition. According to the emotional theory of sales, the choice of a product is influenced not only by the characteristics of the "main

product", but also the characteristics of the "additional products" of activities of the manufacturer (we are talking about such activities as after-sales, advertising, related with the solution of social problems, etc.). In such a way, it is a question of acquisition of group of products of activity of the producer, so-called «integrated product». The authors of this article developed methods of assessing the competitiveness of cabotage cargo maritime transport consists of four steps: 1) calculation of consumer value indicator of this cabotage cargo maritime transport as an integrated product; 2) calculation of consumer attractiveness of this cabotage cargo maritime transport as an integrated product; 3) calculation of indicators of consumer relevance and consumer attractiveness of competing integrated products; 4) calculation of the competitiveness index of this cabotage cargo maritime transport as a correlation of the consumer attractiveness of this «integrated product» and the maximum of consumer attractiveness of competing integrated products.

**Key words:** cabotage cargo sea transport, emotional theory of sales, management system of maritime competitiveness in the company.

Обеспечение конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок является одной из основных целей деятельности судоходных компаний, занимающихся каботажными морскими перевозками. Однако до настоящего времени среди ученых и специалистов отсутствуют общепризнанные методики, которые позволяют оценить конкурентоспособность таких перевозок.

По мнению авторов, сегодня одним из наиболее перспективных методологических подходов к оценке конкурентоспособности продукции (в частности, морских перевозок) является коммуникативный подход.

Дело в том, что существуют два принципиально разных методологических подхода к оценке конкурентоспособности продукции: экономический и коммуникативный. Если первый подход использует в качестве показателей конкурентоспособности продукции результаты экономической деятельности компании (прежде всего, речь идет о рентабельности продукции), то второй подход использует в качестве таких показателей результаты оценки потребительной значимости продукции непосредственно потребителями (экспертами). Причем очевидным недостатком экономических показателей конкурентоспособности продукции является их «запаздывающий», «констатирующий» характер. В то время как коммуникативные показатели носят «упреждающий» характер, поскольку позволяют зафиксировать потерю конкурентоспособности продукции достаточно оперативно, не дожидаясь получения сведений из бухгалтерских отчетов.

По мнению авторов, наиболее перспективным коммуникативным методом оценки конкурентоспособности продукции является метод, основанный на эмоциональной теории продаж, которая представляет собой теорию выбора наиболее привлекательного товара в условиях рыночной конкуренции [1].

Согласно эмоциональной теории продаж, на выбор того или иного товара оказывают влияние не только потребительские характеристики так называемого «основного продукта», но и потребительские характеристики так называемых «дополнительных продуктов» деятельности производителя (речь о таких видах деятельности как послепродажная, рекламная, связанная с решением социальных проблем и т.д.). Таким образом, говоря о приобретении того или иного основного продукта, по большому счету, речь идет о приобретении группы продуктов деятельности производителя, так называемого «интегрированного продукта» (рис. 1).



Рис. 1. Структура интегрированного продукта

Целью данной работы является разработка методики оценки конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок судоходной компании как интегрированного продукта на основе эмоциональной теории продаж и квалиметрии. Указанная методика включает в себя четыре этапа.

**Первый этап.** Расчет показателя потребительной значимости каботажной грузовой морской перевозки как интегрированного продукта. Причем ранее А.А. Исаев уже предложил свой подход к оценке конкурентоспособности продукции на основании эмоциональной теории продаж и квалиметрии [2], а Е.С.Мегей выявила основные потребительские характеристики интегрированного транспортного продукта [3].

Данный этап предусматривает расчет показателя потребительной значимости интегрированного транспортного продукта по формуле:  $ПЗИП = \sum K_i \times ПЗ_i$ , где  $ПЗИП$  – показатель потребительной значимости интегрированного транспортного продукта, балл.;  $K_i$  – коэффициент значимости (весомости) данной потребительской характеристики интегрированного транспортного продукта;  $ПЗ_i$  – показатель потребительной значимости данной потребительской характеристики интегрированного транспортного продукта, балл. При этом  $\sum K_i = 1,0$ .

**Второй этап.** Расчет показателя потребительной привлекательности интегрированного транспортного продукта по формуле:  $ППИП = ПЗИП / Ц$ , где  $ППИП$  – показатель потребительной привлекательности интегрированного транспортного продукта, балл./руб.;  $ПЗИП$  – показатель потребительной значимости интегрированного транспортного продукта, балл.;  $Ц$  – цена перевозки, руб.

**Третий этап.** Расчет показателей потребительной значимости и потребительной привлекательности интегрированного транспортного продукта судоходных предприятий-конкурентов.

**Четвертый этап.** Расчет показателя конкурентоспособности каботажной грузовой морской

перевозки как интегрированного продукта данного судоходного предприятия по формуле:  $KП = ППИП / ППИП_{max}$ , где  $KП$  – показатель конкурентоспособности каботажной грузовой морской перевозки как интегрированного продукта данного судоходного предприятия;  $ППИП$  – показатель потребительской привлекательности интегрированного продукта данного судоходного предприятия, балл./руб.;  $ППИП_{max}$  – максимальный показатель потребительской привлекательности интегрированного продукта предприятий-конкурентов, балл./руб.

По сути, речь идет об относительном показателе потребительской привлекательности интегрированного продукта данного судоходного предприятия. Согласно эмоциональной теории продаж, покупатель выберет данную перевозку среди всех перевозок лишь в том случае, если показатель конкурентоспособности данной перевозки больше или равен 1,0.

Причем следует учитывать, что характер методики оценки конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок зависит, прежде всего, от ценовой категории перевозки. Поскольку цена перевозки меняет отношение покупателя к значимости (весомости) соответствующей потребительской характеристики.

В этой связи авторами разработаны три методики оценки конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок для трех ценовых диапазонов («Обычный (стандартный) покупатель»):

- А) низкий ценовой диапазон;
- Б) средний ценовой диапазон;
- В) высокий ценовой диапазон.

В табл. 1 представлены результаты оценки коэффициента значимости (весомости) потребительских характеристик каботажных грузовых морских перевозок с учетом ценового диапазона (категория «Обычный (стандартный) покупатель»).

Таким образом, показатель потребительской значимости каботажных грузовых морских перевозок как «интегрированного продукта» ( $ПЗИП$ ) для трех ценовых категорий можно рассчитать по следующим формулам.

1) Низкий ценовой диапазон.

$$ПЗИП_{ндд} = 0,093 \times ПЗ_1 + 0,010 \times ПЗ_2 + 0,010 \times ПЗ_3 + 0,010 \times ПЗ_4 + 0,010 \times ПЗ_5 + 0,010 \times ПЗ_6 + 0,010 \times ПЗ_7 + 0,010 \times ПЗ_8 + 0,010 \times ПЗ_9 + 0,031 \times ПЗ_{10} + 0,010 \times ПЗ_{11} + 0,010 \times ПЗ_{12} + 0,010 \times ПЗ_{13} + 0,010 \times ПЗ_{14} + 0,031 \times ПЗ_{15} + 0,031 \times ПЗ_{16} + 0,031 \times ПЗ_{17} + 0,031 \times ПЗ_{18} + 0,010 \times ПЗ_{19} + 0,093 \times ПЗ_{20} + 0,093 \times ПЗ_{21} + 0,010 \times ПЗ_{22} + 0,010 \times ПЗ_{23} + 0,010 \times ПЗ_{24} + 0,010 \times ПЗ_{25} + 0,010 \times ПЗ_{26} + 0,010 \times ПЗ_{27} + 0,010 \times ПЗ_{28} + 0,010 \times ПЗ_{29} + 0,031 \times ПЗ_{30} + 0,010 \times ПЗ_{31} + 0,010 \times ПЗ_{32} + 0,010 \times ПЗ_{33} + 0,010 \times ПЗ_{34} + 0,010 \times ПЗ_{35} + 0,010 \times ПЗ_{36} + 0,010 \times ПЗ_{37} + 0,031 \times ПЗ_{38} + 0,031 \times ПЗ_{39} + 0,031 \times ПЗ_{40} + 0,093 \times ПЗ_{41} + 0,010 \times ПЗ_{42} + 0,010 \times ПЗ_{43} + 0,010 \times ПЗ_{44} + 0,031 \times ПЗ_{45}, \text{ балл.}$$

2) Средний ценовой диапазон

$$ПЗИП_{сдд} = 0,052 \times ПЗ_1 + 0,017 \times ПЗ_2 + 0,006 \times ПЗ_3 + 0,017 \times ПЗ_4 + 0,006 \times ПЗ_5 + 0,017 \times ПЗ_6 + 0,006 \times ПЗ_7 + 0,00 \times ПЗ_8 + 0,017 \times ПЗ_9 + 0,017 \times ПЗ_{10} + 0,006 \times ПЗ_{11} + 0,006 \times ПЗ_{12} + 0,017 \times ПЗ_{13} + 0,017 \times ПЗ_{14} + 0,052 \times ПЗ_{15} + 0,052 \times ПЗ_{16} + 0,052 \times ПЗ_{17} + 0,052 \times ПЗ_{18} + 0,052 \times ПЗ_{19} + 0,052 \times ПЗ_{20} + 0,052 \times ПЗ_{21} + 0,052 \times ПЗ_{22} + 0,052 \times ПЗ_{23} + 0,052 \times ПЗ_{24} + 0,052 \times ПЗ_{25} + 0,052 \times ПЗ_{26} + 0,052 \times ПЗ_{27} + 0,052 \times ПЗ_{28} + 0,052 \times ПЗ_{29} + 0,052 \times ПЗ_{30} + 0,052 \times ПЗ_{31} + 0,052 \times ПЗ_{32} + 0,052 \times ПЗ_{33} + 0,052 \times ПЗ_{34} + 0,052 \times ПЗ_{35} + 0,052 \times ПЗ_{36} + 0,052 \times ПЗ_{37} + 0,052 \times ПЗ_{38} + 0,052 \times ПЗ_{39} + 0,052 \times ПЗ_{40} + 0,052 \times ПЗ_{41} + 0,052 \times ПЗ_{42} + 0,052 \times ПЗ_{43} + 0,052 \times ПЗ_{44} + 0,052 \times ПЗ_{45}, \text{ балл.}$$

$$0,006 \times ПЗ_{19} + 0,052 \times ПЗ_{20} + 0,052 \times ПЗ_{21} + 0,006 \times ПЗ_{22} + 0,006 \times ПЗ_{23} + 0,017 \times ПЗ_{24} + 0,017 \times ПЗ_{25} + 0,017 \times ПЗ_{26} + 0,006 \times ПЗ_{27} + 0,017 \times ПЗ_{28} + 0,017 \times ПЗ_{29} + 0,052 \times ПЗ_{30} + 0,017 \times ПЗ_{31} + 0,017 \times ПЗ_{32} + 0,006 \times ПЗ_{33} + 0,006 \times ПЗ_{34} + 0,017 \times ПЗ_{35} + 0,017 \times ПЗ_{36} + 0,017 \times ПЗ_{37} + 0,017 \times ПЗ_{38} + 0,052 \times ПЗ_{39} + 0,052 \times ПЗ_{40} + 0,017 \times ПЗ_{41} + 0,006 \times ПЗ_{42} + 0,006 \times ПЗ_{43} + 0,017 \times ПЗ_{44} + 0,052 \times ПЗ_{45}, \text{ балл.}$$

3) Высокий ценовой диапазон.

$$ПЗИП_{вдд} = 0,023 \times ПЗ_1 + 0,023 \times ПЗ_2 + 0,023 \times ПЗ_3 + 0,023 \times ПЗ_4 + 0,023 \times ПЗ_5 + 0,023 \times ПЗ_6 + 0,023 \times ПЗ_7 + 0,023 \times ПЗ_8 + 0,023 \times ПЗ_9 + 0,023 \times ПЗ_{10} + 0,003 \times ПЗ_{11} + 0,023 \times ПЗ_{12} + 0,023 \times ПЗ_{13} + 0,023 \times ПЗ_{14} + 0,023 \times ПЗ_{15} + 0,023 \times ПЗ_{16} + 0,023 \times ПЗ_{17} + 0,023 \times ПЗ_{18} + 0,023 \times ПЗ_{19} + 0,023 \times ПЗ_{20} + 0,023 \times ПЗ_{21} + 0,008 \times ПЗ_{22} + 0,023 \times ПЗ_{23} + 0,023 \times ПЗ_{24} + 0,023 \times ПЗ_{25} + 0,023 \times ПЗ_{26} + 0,023 \times ПЗ_{27} + 0,023 \times ПЗ_{28} + 0,023 \times ПЗ_{29} + 0,023 \times ПЗ_{30} + 0,023 \times ПЗ_{31} + 0,023 \times ПЗ_{32} + 0,023 \times ПЗ_{33} + 0,023 \times ПЗ_{34} + 0,023 \times ПЗ_{35} + 0,023 \times ПЗ_{36} + 0,023 \times ПЗ_{37} + 0,023 \times ПЗ_{38} + 0,023 \times ПЗ_{39} + 0,023 \times ПЗ_{40} + 0,023 \times ПЗ_{41} + 0,008 \times ПЗ_{42} + 0,023 \times ПЗ_{43} + 0,023 \times ПЗ_{44} + 0,023 \times ПЗ_{45}, \text{ балл.}$$

Соответственно показатель потребительской привлекательности каботажных грузовых морских перевозок как «интегрированного продукта» ( $ППИП$ ) для трех ценовых категорий можно рассчитать по следующим формулам.

1) Низкий ценовой диапазон.

$$ППИП_{ндд} = ПЗИП_{ндд} / Ц = (0,093 \times ПЗ_1 + 0,010 \times ПЗ_2 + 0,010 \times ПЗ_3 + 0,010 \times ПЗ_4 + 0,010 \times ПЗ_5 + 0,010 \times ПЗ_6 + 0,010 \times ПЗ_7 + 0,010 \times ПЗ_8 + 0,010 \times ПЗ_9 + 0,031 \times ПЗ_{10} + 0,010 \times ПЗ_{11} + 0,010 \times ПЗ_{12} + 0,010 \times ПЗ_{13} + 0,010 \times ПЗ_{14} + 0,031 \times ПЗ_{15} + 0,031 \times ПЗ_{16} + 0,031 \times ПЗ_{17} + 0,031 \times ПЗ_{18} + 0,010 \times ПЗ_{19} + 0,093 \times ПЗ_{20} + 0,093 \times ПЗ_{21} + 0,010 \times ПЗ_{22} + 0,010 \times ПЗ_{23} + 0,010 \times ПЗ_{24} + 0,010 \times ПЗ_{25} + 0,010 \times ПЗ_{26} + 0,010 \times ПЗ_{27} + 0,010 \times ПЗ_{28} + 0,010 \times ПЗ_{29} + 0,031 \times ПЗ_{30} + 0,010 \times ПЗ_{31} + 0,010 \times ПЗ_{32} + 0,010 \times ПЗ_{33} + 0,010 \times ПЗ_{34} + 0,010 \times ПЗ_{35} + 0,010 \times ПЗ_{36} + 0,010 \times ПЗ_{37} + 0,031 \times ПЗ_{38} + 0,031 \times ПЗ_{39} + 0,031 \times ПЗ_{40} + 0,093 \times ПЗ_{41} + 0,010 \times ПЗ_{42} + 0,010 \times ПЗ_{43} + 0,010 \times ПЗ_{44} + 0,031 \times ПЗ_{45}) / Ц, \text{ балл./руб.}$$

2) Средний ценовой диапазон.

$$ППИП_{сдд} = ПЗИП_{сдд} / Ц = (0,052 \times ПЗ_1 + 0,017 \times ПЗ_2 + 0,006 \times ПЗ_3 + 0,017 \times ПЗ_4 + 0,006 \times ПЗ_5 + 0,017 \times ПЗ_6 + 0,006 \times ПЗ_7 + 0,00 \times ПЗ_8 + 0,017 \times ПЗ_9 + 0,017 \times ПЗ_{10} + 0,006 \times ПЗ_{11} + 0,006 \times ПЗ_{12} + 0,017 \times ПЗ_{13} + 0,017 \times ПЗ_{14} + 0,052 \times ПЗ_{15} + 0,052 \times ПЗ_{16} + 0,052 \times ПЗ_{17} + 0,052 \times ПЗ_{18} + 0,006 \times ПЗ_{19} + 0,052 \times ПЗ_{20} + 0,052 \times ПЗ_{21} + 0,006 \times ПЗ_{22} + 0,006 \times ПЗ_{23} + 0,017 \times ПЗ_{24} + 0,017 \times ПЗ_{25} + 0,017 \times ПЗ_{26} + 0,006 \times ПЗ_{27} + 0,017 \times ПЗ_{28} + 0,017 \times ПЗ_{29} + 0,052 \times ПЗ_{30} + 0,017 \times ПЗ_{31} + 0,017 \times ПЗ_{32} + 0,006 \times ПЗ_{33} + 0,006 \times ПЗ_{34} + 0,017 \times ПЗ_{35} + 0,017 \times ПЗ_{36} + 0,017 \times ПЗ_{37} + 0,017 \times ПЗ_{38} + 0,052 \times ПЗ_{39} + 0,052 \times ПЗ_{40} + 0,017 \times ПЗ_{41} + 0,006 \times ПЗ_{42} + 0,006 \times ПЗ_{43} + 0,017 \times ПЗ_{44} + 0,052 \times ПЗ_{45}) / Ц, \text{ балл./руб.}$$

3) Высокий ценовой диапазон.

$$ППИП_{вдд} = ПЗИП_{вдд} / Ц = (0,023 \times ПЗ_1 + 0,023 \times ПЗ_2 + 0,023 \times ПЗ_3 + 0,023 \times ПЗ_4 + 0,023 \times ПЗ_5 + 0,023 \times ПЗ_6 + 0,023 \times ПЗ_7 + 0,023 \times ПЗ_8 + 0,023 \times ПЗ_9 + 0,023 \times ПЗ_{10} + 0,003 \times ПЗ_{11} + 0,023 \times ПЗ_{12} + 0,023 \times ПЗ_{13} + 0,023 \times ПЗ_{14} + 0,023 \times ПЗ_{15} + 0,023 \times ПЗ_{16} + 0,023 \times ПЗ_{17} + 0,023 \times ПЗ_{18} + 0,023 \times ПЗ_{19} + 0,023 \times ПЗ_{20} + 0,023 \times ПЗ_{21} + 0,023 \times ПЗ_{22} + 0,023 \times ПЗ_{23} + 0,023 \times ПЗ_{24} + 0,023 \times ПЗ_{25} + 0,023 \times ПЗ_{26} + 0,023 \times ПЗ_{27} + 0,023 \times ПЗ_{28} + 0,023 \times ПЗ_{29} + 0,023 \times ПЗ_{30} + 0,023 \times ПЗ_{31} + 0,023 \times ПЗ_{32} + 0,023 \times ПЗ_{33} + 0,023 \times ПЗ_{34} + 0,023 \times ПЗ_{35} + 0,023 \times ПЗ_{36} + 0,023 \times ПЗ_{37} + 0,023 \times ПЗ_{38} + 0,023 \times ПЗ_{39} + 0,023 \times ПЗ_{40} + 0,023 \times ПЗ_{41} + 0,023 \times ПЗ_{42} + 0,023 \times ПЗ_{43} + 0,023 \times ПЗ_{44} + 0,023 \times ПЗ_{45}) / Ц, \text{ балл./руб.}$$

$0,023 \times ПЗ_{21} + 0,008 \times ПЗ_{22} + 0,023 \times ПЗ_{23} + 0,023 \times ПЗ_{24} + 0,023 \times ПЗ_{25} + 0,023 \times ПЗ_{26} + 0,023 \times ПЗ_{27} + 0,023 \times ПЗ_{28} + 0,023 \times ПЗ_{29} + 0,023 \times ПЗ_{30} + 0,023 \times ПЗ_{31} + 0,023 \times ПЗ_{32} + 0,023 \times ПЗ_{33} + 0,023 \times ПЗ_{34} + 0,023 \times ПЗ_{35} + 0,023 \times ПЗ_{36} + 0,023 \times ПЗ_{37} + 0,023 \times ПЗ_{38} + 0,023 \times ПЗ_{39} + 0,023 \times ПЗ_{40} + 0,023 \times ПЗ_{41} + 0,008 \times ПЗ_{42} + 0,023 \times ПЗ_{43} + 0,023 \times ПЗ_{44} + 0,023 \times ПЗ_{45}$  ) / Ц, балл./руб.

В свою очередь показатель конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок как «интегрированного продукта» (КП) для трех ценовых категорий можно рассчитать по следующим формулам.

1) Низкий ценовой диапазон.

$$КП_{нцд} = ППИП_{нцд} / ППИП_{нцд \text{ макс.}}$$

2) Средний ценовой диапазон.

$$КП_{сцд} = ППИП_{сцд} / ППИП_{сцд \text{ макс.}}$$

3) Высокий ценовой диапазон.

$$КП_{вцд} = ППИП_{вцд} / ППИП_{вцд \text{ макс.}}$$

В заключение хотелось бы подчеркнуть, что предложенные три методики оценки конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок позволяют создать в морских судоходных компаниях научно обоснованную систему управления конкурентоспособностью таких перевозок.

Таблица 1

Коэффициенты значимости (весомости) потребительских характеристик каботажных грузовых морских перевозок с учетом ценового диапазона (категория «Обычный (стандартный) покупатель»)

№	Название потребительской характеристики интегрированного транспортного продукта	Низкий ценовой диапазон	Средний ценовой диапазон	Высокий ценовой диапазон
1	Защита груза от повреждения в пути следования	$K_1 = 0,093$	$K_1 = 0,052$	$K_1 = 0,023$
2	Сроки и соблюдение сроков доставки груза	$K_2 = 0,010$	$K_2 = 0,017$	$K_2 = 0,023$
3	Экспедирование груза на всех звеньях цепи доставки	$K_3 = 0,010$	$K_3 = 0,006$	$K_3 = 0,023$
4	Охрана груза в пути следования	$K_4 = 0,010$	$K_4 = 0,017$	$K_4 = 0,023$
5	Финансовые услуги (кредитование)	$K_5 = 0,010$	$K_5 = 0,006$	$K_5 = 0,023$
6	Специализация предприятия на данном виде перевозки	$K_6 = 0,010$	$K_6 = 0,017$	$K_6 = 0,023$
7	Страхование груза	$K_7 = 0,010$	$K_7 = 0,006$	$K_7 = 0,023$
8	Индивидуальное проектирование погрузки груза	$K_8 = 0,010$	$K_8 = 0,006$	$K_8 = 0,023$
9	Индивидуальное проектирование нескольких вариантов доставки груза	$K_9 = 0,010$	$K_9 = 0,017$	$K_9 = 0,023$
10	Наличие сайта в интернете	$K_{10} = 0,031$	$K_{10} = 0,017$	$K_{10} = 0,023$
11	Расчет ставок в режиме on-line (on-line калькулятор)	$K_{11} = 0,010$	$K_{11} = 0,006$	$K_{11} = 0,003$
12	Продвижение компании в интернет-ресурсах	$K_{12} = 0,010$	$K_{12} = 0,006$	$K_{12} = 0,023$
13	Предоставление дополнительных складских услуг по упаковке	$K_{13} = 0,010$	$K_{13} = 0,017$	$K_{13} = 0,023$
14	Услуги перегруза	$K_{14} = 0,010$	$K_{14} = 0,017$	$K_{14} = 0,023$
15	Месторасположение офиса	$K_{15} = 0,031$	$K_{15} = 0,052$	$K_{15} = 0,023$
16	Наличие автомобильной парковки возле офиса для транспорта отправителя	$K_{16} = 0,031$	$K_{16} = 0,052$	$K_{16} = 0,023$
17	Удобный график работы	$K_{17} = 0,031$	$K_{17} = 0,052$	$K_{17} = 0,023$
18	Наличие корпоративной мобильной связи	$K_{18} = 0,031$	$K_{18} = 0,052$	$K_{18} = 0,023$
19	Наличие номера 8-800...	$K_{19} = 0,010$	$K_{19} = 0,006$	$K_{19} = 0,023$
20	Наличие разрешительной документации	$K_{20} = 0,093$	$K_{20} = 0,052$	$K_{20} = 0,023$
21	Наличие банковского расчетного счета в рублях	$K_{21} = 0,093$	$K_{21} = 0,052$	$K_{21} = 0,023$
22	Наличие собственных складов с предоставлением услуг хранения	$K_{22} = 0,010$	$K_{22} = 0,006$	$K_{22} = 0,008$
23	Наличие собственной широкой технической базы	$K_{23} = 0,010$	$K_{23} = 0,006$	$K_{23} = 0,023$
24	Возможность организации транспортировки различных видов груза (сборные, тяжеловесные, негабаритные)	$K_{24} = 0,010$	$K_{24} = 0,017$	$K_{24} = 0,023$
25	Возможность организации доставки грузов двумя и более видами транспорта (мультиmodalность)	$K_{25} = 0,010$	$K_{25} = 0,017$	$K_{25} = 0,023$

Основные показатели

26		Возможность предоставления персонального менеджера	$K_{26} = 0,010$	$K_{26} = 0,017$	$K_{26} = 0,023$
27		Наличие автоматизированной системы обработки и приема заявок	$K_{27} = 0,010$	$K_{27} = 0,006$	$K_{27} = 0,023$
28		Оперативная адаптация к условиям меняющегося рынка	$K_{28} = 0,010$	$K_{28} = 0,017$	$K_{28} = 0,023$
29		Компетентность персонала	$K_{29} = 0,010$	$K_{29} = 0,017$	$K_{29} = 0,023$
30		Соблюдение конфиденциальности	$K_{30} = 0,031$	$K_{30} = 0,052$	$K_{30} = 0,023$
31	Дополнительные показатели	Известность бренда судоходного предприятия	$K_{31} = 0,010$	$K_{31} = 0,017$	$K_{31} = 0,023$
32		Деловая репутация судоходного предприятия	$K_{32} = 0,010$	$K_{32} = 0,017$	$K_{32} = 0,023$
33		Финансовая устойчивость предприятия	$K_{33} = 0,010$	$K_{33} = 0,006$	$K_{33} = 0,023$
34		Личность руководителя	$K_{34} = 0,010$	$K_{34} = 0,006$	$K_{34} = 0,023$
35		Участие в корпоративной сети	$K_{35} = 0,010$	$K_{35} = 0,017$	$K_{35} = 0,023$
36		Известность деловых партнеров	$K_{36} = 0,010$	$K_{36} = 0,017$	$K_{36} = 0,023$
37		Известность брендов логистических продуктов	$K_{37} = 0,010$	$K_{37} = 0,017$	$K_{37} = 0,023$
38		Уровень внутрикорпоративной культуры управления	$K_{38} = 0,031$	$K_{38} = 0,017$	$K_{38} = 0,023$
39		Уровень внутрикорпоративной культуры поведения персонала	$K_{39} = 0,031$	$K_{39} = 0,052$	$K_{39} = 0,023$
40		Внешний вид офисного здания, помещения	$K_{40} = 0,031$	$K_{40} = 0,052$	$K_{40} = 0,023$
41		Наличие профессиональных знаков отличия	$K_{41} = 0,093$	$K_{41} = 0,017$	$K_{41} = 0,023$
42		Качество информационно-рекламных продуктов	$K_{42} = 0,010$	$K_{42} = 0,006$	$K_{42} = 0,008$
43		Участие в решении социальных проблем	$K_{43} = 0,010$	$K_{43} = 0,006$	$K_{43} = 0,023$
44		Членство предприятия в профессиональных ассоциациях	$K_{44} = 0,010$	$K_{44} = 0,017$	$K_{44} = 0,023$
45		Уровень фирменного стиля	$K_{45} = 0,031$	$K_{45} = 0,052$	$K_{45} = 0,023$
		<b>ИТОГО <math>\Sigma P_i</math></b>	1,000	1,000	1,000

### Литература

- 1.Исаев, А.А. Оценка конкурентоспособности продукции: методологический аспект / А.А. Исаев // Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС. – 2017. – Т.9. № 2. – С. 144-150.
- 2.Исаев, А.А. Эмоциональная теория продаж / А.А. Исаев. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2016. – 136 с.
- 3.Мегей, Е.С. Основные факторы конкурентоспособности логистического предприятия / Е.С. Мегей // Актуальные проблемы рынка: сборник научных статей. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2016. – 66-78.

### References

- 1.Isaev, A. A. Ocenka konkurentosposobnosti produkcii: metodologicheskij aspekt. Territorija novyh vozmozhnostej. Vestnik VVSU [Assessment of product competitiveness: methodological aspect]. Territory of new opportunities. Vestnik VVSU), Vol.9. № 2, pp. 144-150.
- 2.Isaev, A. A. Jemocional'naja teorija prodazh [Emotional theory of sales]. Vladivostok, VVSU Publ., 2016. 136 p.
3. Megey, E.S. Osnovnie faktori konkurentosposobnosti logisticheskogo predpriyatija. Aktual'nye problemy rynka: sbornik nauchnyh statej [The main factors of logistic enterprise competitiveness]. Actual problems of the market: Collections of scientific papers). Vladivostok, VVSU Publ., 2016. pp. 66-78.



## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН**

УДК 681.518; 519.2; 004.89

### **ПРИНЦИПЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ**

#### **Александр Алексеевич Таранцев**

доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С.Соломенко Российской академии наук (ИПТ РАН)  
199178, Санкт-Петербург, 12 линия ВО, 13  
профессор Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России  
196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149  
тел. (812)328-40-71 e-mail: info@iptran.ru

#### **Шакиб Субхиевич Фахми**

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С.Соломенко Российской академии наук (ИПТ РАН)  
199178, Россия, Санкт-Петербург, 12 линия В.О., д. 13;  
Профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (ЛЭТИ) им. В.И.Ульянова (Ленина),  
197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д.5  
Тел. +7 812 346-44-87 e-mail: shakeebf@mail.ru

#### **Наталья Викторовна Шаталова**

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С.Соломенко Российской академии наук (ИПТ РАН)  
199178, Россия, Санкт-Петербург, 12 линия В.О., д. 13, shatillen@mail.ru

#### **Аннотация**

Рассмотрены вопросы построения математических моделей логических схем по результатам их тестирования. Показано, что математические модели логических схем могут быть построены тремя способами – алгебраическим, нейросетевым и с использованием регрессионного анализа. В первом случае показана возможность построения алгебраических выражений, связывающих выходы схем с их  $m$  входами по результатам решения систем алгебраических уравнений размерностью  $2^m \times 2^m$ . Во втором случае логические схемы представляются в виде нейронов, востовые функции которых определяются с использованием обучающих выборок как результатов тестирования логических схем. В третьем случае по результатам тестирования логических схем строятся адекватные квазилинейные регрессионные уравнения, связывающие выходы логических схем с их входами. Но, в отличие от первого случая, регрессионные уравнения гораздо компактнее стандартных алгебраических уравнений. Приведены соответствующие математические выражения и примеры применительно к трёхходовым логическим схемам. Дана сравнительная оценка трёх способов описания логических схем.

**Ключевые слова:** системы управления, логические схемы, нейронные сети, регрессионный анализ

## **PRINCIPLES OF THE MATHEMATICAL DESCRIPTION OF LOGIC CIRCUITS**

#### **Alexander A. Tarantsev**

Professor, Dr.Sci.Tech., the Head of Laboratory of Solomenko's Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,  
12-th Line VO, 13, St.Petersburg, 199178, Russian Federation;  
Professor of Saint Petersburg University of State Fire Service OofEMERCOME of Russia  
Moskovskiy Avenue, 149, St. Petersburg 196105, Russia  
tel: +7 (812) 328-40-71 e-mail: info@iptran.ru

#### **Shakeeb S. Fahmi**

Dr.Sci.Tech., Associate Professor, Leading Researcher of Solomenko's Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,  
12-th Line VO, 13, St.Petersburg, 199178, Russia,  
Professor of Saint Petersburg state electrotechnical University (LETI). V.I. Ulyanov (Lenin), 197376, Saint-Petersburg, Professora Popova str., 5, Russia  
Tel. +7 812 346-44-87 e-mail: shakeebf@mail.ru

#### **Natal'ja V. Shatalova**

Cand. Sci.Tech., Leading Researcher of Solomenko's Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,  
12-th Line VO, 13, St.Petersburg, 199178, Russia,  
Tel: +7 (812) 328-40-71 e-mail: shatillen@mail.ru

**Abstract**

Questions of construction of mathematical models of logical schemes by results of their testing are considered. It is shown that mathematical models of logical schemes can be constructed in three ways – algebraic, neural network and using regression analysis. In the first case, it is shown that it is possible to construct algebraic expressions connecting the outputs of the circuits with their  $m$  inputs based on the results of solving the systems of algebraic equations with a dimension of  $2^m \times 2^m$ . In the second case, the logical schemes are presented in the form of neurons, the vestal functions of which are determined using training samples as the results of testing logical schemes. In the third case, based on the results of testing of logical schemes, adequate quasi-linear regression equations are constructed, linking the outputs of logical schemes with their inputs. But, unlike the first case, regression equations are much more compact than standard algebraic equations. The corresponding mathematical expressions and examples in relation to three-input logical schemes are given. The comparative estimation of three ways of description of logical schemes is given.

**Keywords:** control systems, logic circuits, neural networks, regression analysis

**Введение**

На практике в системах управления [1] мобильными и иными объектами, в т.ч. в системах пожарной автоматики [2] широкое распространение получили логические схемы (ЛС) [3, 4], на вход которых подаются  $m$  сигналов (воздействующих факторов – ВФ)  $x_1 \div x_m$ , а на выходе в зависимости от сочетаний входных сигналов формируются значения выходного параметра (ВП)  $y$  (рис.1) в двоичном виде “0-1”.

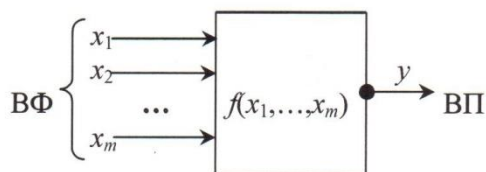


Рис.1 Общее представление логической схемы

Одна из важных задач заключается в том, чтобы по протоколу тестирования ЛС в виде матрицы ВФ  $X$  размером  $m$  столбцов (по числу ВФ) на  $n$  строк (по числу испытаний) и  $n$ -мерному вектору ВП  $Y$  найти адекватное описание - математическую модель (ММ) ЛС в виде:

$$y = f(x_1, \dots, x_m). \tag{1}$$

Наличие ММ (1) позволяет решать ряд прикладных задач – от распознавания структуры схемы в виде сочетаний стандартных элементов «И», «ИЛИ», «НЕ» [3] до помехоустойчивости ЛС при поступлении на её вход зашумлённых или ошибочных сигналов [5].

В данной работе предлагается три способа построения ММ (1) ЛС по результатам тестирования – алгебраический (традиционный), на основе нейросетей [6] и с применением многофакторного регрессионного анализа [7].

**1. Алгебраический способ**

Алгебраический способ построения ММ (1) ЛС предполагает по матрице  $X$  и вектору  $Y$  получение алгебраического выражения:

$$y = a_0 + \sum_{j=1}^m a_j x_j + a_{m+1} x_1 x_2 + \dots + a_{m+C_m^2} x_{m-1} x_m + S(x_1, \dots, x_m), \tag{2}$$

где  $a_k, k=0, \dots, 2^m-1$  - коэффициенты, подлежащие определению по результатам тестирования ЛС;  $S(x_1, \dots, x_m)$  – сумма членов выражения (2), представляющих собой произведения из 3-х, 4-х и более ВФ (очевидно,  $S=0$  при  $m=2$ ).

Для двухвходовой ( $m=2$ ) ЛС по результатам её полного тестирования двоичными сигналами, когда матрица ВФ  $X$  и вектор ВП  $Y$  имеют вид

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix},$$

выражение (2) принимает вид [3]:

$$y = a_0 + \sum_1^2 a_j x_j + a_3 x_1 x_2, \tag{3}$$

где  $a_0=y_1$ ;  $a_1=y_2-y_1$ ;  $a_2=y_3-y_1$ ;  $a_3=y_1-y_2-y_3+y_4$ .

Для трёхвходовой ( $m=3$ ) ЛС, когда

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \end{bmatrix},$$

выражение (2) принимает вид [3]:

$$y = a_0 + \sum_1^3 a_j x_j + a_4 x_1 x_2 +$$

$$+ a_5 x_1 x_3 + a_6 x_2 x_3 + a_7 x_1 x_2 x_3; \quad (4)$$

где  $a_0=y_1$ ;  $a_1=y_2-y_1$ ;  $a_2=y_3-y_1$ ;  $a_3=y_4-y_1$ ;  
 $a_4=y_1-y_2-y_3+y_5$ ;  $a_5=y_1-y_2-y_4+y_6$ ;  
 $a_6=y_1-y_3-y_4+y_7$ ;  $a_7 = -y_1 + \sum_2^4 y_i - \sum_5^7 y_i + y_8$ .

Получены аналогичные выражения (2) для  $m=4$  и  $m=5$  (матрицы  $X$  и векторы  $Y$  не приводятся ввиду их громоздкости), они имеют соответственно вид:

$$y = a_0 + \sum_1^4 a_i x_i + a_5 x_1 x_2 + a_6 x_1 x_3 + \quad (5)$$

$$+ a_7 x_2 x_4 + a_8 x_2 x_3 + a_9 x_2 x_4 + a_{10} x_3 x_4 + S,$$

где  $S = a_{11} x_1 x_2 x_3 + a_{12} x_1 x_2 x_4 +$   
 $+ a_{13} x_1 x_3 x_4 + a_{14} x_2 x_3 x_4 + a_{15} x_1 x_2 x_3 x_4$ ;

$a_0=y_1$ ;  $a_1=y_2-y_1$ ;  $a_2=y_3-y_1$ ;  $a_3=y_4-y_1$ ;  
 $a_4=y_5-y_1$ ;  $a_5=y_1-y_2-y_3+y_6$ ;  $a_6=y_1-y_2-y_4+y_7$ ;  
 $a_7=y_1-y_2-y_5+y_8$ ;  $a_8=y_1-y_3-y_4+y_9$ ;  
 $a_9=y_1-y_3-y_5+y_{10}$ ;  $a_{10}=y_1-y_4-y_5+y_{11}$ ;  
 $a_{11} = -y_1+y_2+y_3-y_6-y_7-y_9+y_{12}$ ;  
 $a_{12} = -y_1+y_2+y_3-y_6-y_8-y_{10}+y_{13}$ ;  
 $a_{13} = -y_1+y_2+y_4-y_7-y_8-y_{11}+y_{14}$ ;  
 $a_{14} = -y_1+y_3+y_4-y_9-y_{10}-y_{11}+y_{15}$ ;  
 $a_{15} = y_1 - \sum_2^5 y_i + \sum_6^{11} y_i - \sum_{12}^{15} y_i + y_{16}$ .

$$y = a_0 + \sum_1^5 a_j x_j + a_6 x_1 x_2 + a_7 x_1 x_3 + \quad (6)$$

$+ a_8 x_1 x_4 + a_{10} x_2 x_3 + a_{11} x_2 x_4 + a_{12} x_2 x_5 +$   
 $+ a_{13} x_3 x_4 + a_{14} x_3 x_5 + a_{15} x_4 x_5 + S$ ;  
 где  $S = a_{16} x_1 x_2 x_3 + a_{17} x_1 x_2 x_4 + a_{18} x_1 x_2 x_5 +$   
 $+ a_{19} x_1 x_3 x_4 + a_{20} x_1 x_3 x_5 + a_{21} x_1 x_4 x_5 + a_{22} x_2 x_3 x_4 +$   
 $+ a_{23} x_2 x_3 x_5 + a_{24} x_2 x_4 x_5 + a_{25} x_3 x_4 x_5 + a_{26} x_1 x_2 x_3 x_4 +$   
 $+ a_{27} x_1 x_2 x_3 x_5 + a_{28} x_1 x_2 x_4 x_5 + a_{29} x_1 x_3 x_4 x_5 +$   
 $+ a_{30} x_2 x_3 x_4 x_5 + a_{31} x_1 x_2 x_3 x_4 x_5$ ;

$a_0=y_1$ ;  $a_i=y_{i+1}-y_1$ ;  $i=1, \dots, 5$ ;  
 $a_6=y_1-y_2-y_3+y_7$ ;  $a_7=y_1-y_2-y_4+y_8$ ;  
 $a_8=y_1-y_2-y_5+y_9$ ;  $a_9=y_1-y_2-y_6+y_{10}$ ;  
 $a_{10}=y_1-y_3-y_4+y_{11}$ ;  $a_{11}=y_1-y_3-y_5+y_{12}$ ;  
 $a_{12}=y_1-y_3-y_6+y_{13}$ ;  $a_{13}=y_1-y_4-y_5+y_{14}$ ;  
 $a_{14}=y_1-y_4-y_6+y_{15}$ ;  $a_{15}=y_1-y_5-y_6+y_{16}$ ;  
 $a_{16}=-y_1+y_2+y_3+y_4-y_7-y_9-y_{11}+y_{17}$ ;  
 $a_{17}=-y_1+y_2+y_3+y_5-y_7-y_9-y_{12}+y_{18}$ ;  
 $a_{18}=-y_1+y_2+y_3+y_6-y_7-y_{10}-y_{13}+y_{19}$ ;  
 $a_{19}=-y_1+y_2+y_4+y_5-y_8-y_9-y_{14}+y_{20}$ ;  
 $a_{20}=-y_1+y_2+y_4+y_6-y_8-y_{10}-y_{15}+y_{21}$ ;  
 $a_{21}=-y_1+y_2+y_5+y_6-y_9-y_{10}-y_{16}+y_{22}$ ;  
 $a_{22}=-y_1+y_3+y_4+y_5-y_{11}-y_{12}-y_{14}+y_{23}$ ;  
 $a_{23}=-y_1+y_3+y_4+y_6-y_{11}-y_{13}-y_{15}+y_{24}$ ;  
 $a_{24}=-y_1+y_3+y_5+y_6-y_{12}-y_{13}-y_{16}+y_{25}$ ;  
 $a_{25}=-y_1+y_4+y_5+y_6-y_{14}-y_{15}-y_{16}+y_{26}$ ;  
 $a_{26}=y_1-y_2-y_3-y_4-y_5+y_7+y_8+y_9+y_{11}+$

$+y_{12}+y_{14}-y_{17}-y_{18}-y_{20}-y_{23}+y_{27}$ ;  
 $a_{27}=y_1-y_2-y_3-y_4-y_6+y_7+y_8+y_{10}+y_{11}+$   
 $+y_{13}+y_{15}-y_{17}-y_{19}-y_{21}-y_{24}+y_{28}$ ;  
 $a_{28}=y_1-y_2-y_3-y_5-y_6+y_7+y_9+y_{10}+y_{12}+$   
 $+y_{13}+y_{16}-y_{18}-y_{19}-y_{22}-y_{25}+y_{29}$ ;  
 $a_{29}=y_1-y_2-y_4-y_5-y_6+y_8+y_9+y_{10}+y_{14}+$   
 $+y_{15}+y_{16}-y_{20}-y_{21}-y_{22}-y_{26}+y_{30}$ ;  
 $a_{30}=y_1-y_2-y_3-y_5-y_6+y_7+y_9+y_{10}+y_{12}+$   
 $+y_{13}+y_{16}-y_{23}-y_{24}-y_{25}-y_{26}+y_{31}$ ;  
 $a_{31} = -y_1 + \sum_2^6 y_i - \sum_7^{16} y_i + \sum_{17}^{26} y_i - \sum_{27}^{31} y_i + y_{32}$ .

Для числа ВФ  $m>5$  формулы получаются громоздкими, поскольку число коэффициентов в выражении (2)  $n=2^m$ . Тем не менее, некоторые общие закономерности просматриваются, а именно:

$$a_0=y_1; a_i=y_{i+1}-y_1; i=1, \dots, m;$$

$$a_{2^m-1} = (-1)^m y_1 + \sum_{k=1}^{m-1} (-1)^{m-k} \sum_{i=1+C_{k-1}}^{C_k} y_i + y_{2^m},$$

$$C_{k-1} = \sum_{j=0}^{k-1} C_m^j, C_k = \sum_{j=0}^k C_m^j.$$

В общем случае вектор коэффициентов  $A=[a_1, \dots, a_n]$  находится из решения матрично-векторного уравнения:

$$A=Z^1 Y, \quad (7)$$

где  $Z$  – квадратная матрица  $n \times n$ , включающую в себя матрицу  $X$  и  $n-1$  подматриц с сочетаниями ВФ, причём 1-й столбец матрицы  $Z$  и диагональ единичные, а правая верхняя часть над диагональю – нулевая. Например, для  $m=2$  и  $m=3$ :

$$Z_{m=2}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix};$$

$$Z_{m=3}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

**2. Описание логических схем нейросетями**

Помимо алгебраического способа построения ММ (1) может быть предложен и нейросетевой, когда ЛС представляется в виде одного или нескольких персептронов [6] или пороговых элементов [4], на вход которых подаётся  $m$  сигналов  $x_1 \div x_m$ , преобразующихся в выходной сигнал  $y$  – см.рис.2.

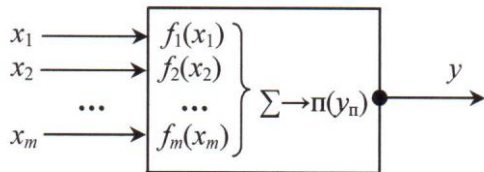


Рис.2 Представление ЛС в виде порогового элемента (персептрона)

Такое преобразование происходит в несколько этапов: сначала входные сигналы (ВФ) преобразуются весовыми функциями  $\{f_j(x_j)\}$ , затем эти функции суммируются и сопоставляются с пороговой функцией  $\pi(y_n)$  и, если суммарная функция меньше пороговой, то  $y=0$ , а если больше или равна пороговой, то  $y=1$ . В качестве пороговой может использоваться ступенчатая единичная функция (рис.3):

$$\pi(y_n) = 0,5[\text{sign}(\sum_1^m f_j(x_j) - y_n) + 1]. \quad (8)$$

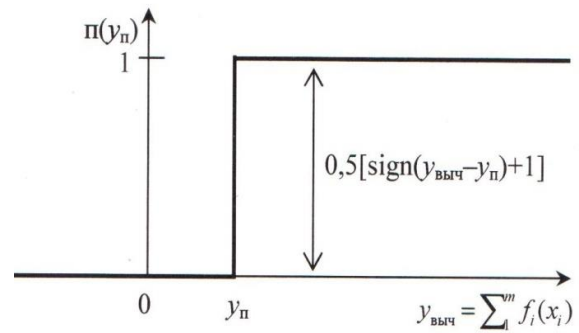


Рис.3 Ступенчатая пороговая функция

На практике функция  $f_j(x_j)$  задаётся как произведение весового коэффициента  $w_j$  на величину входного сигнала  $x_j$ :

$$f_j(x_j) = w_j x_j, \quad j=1, \dots, m, \quad (9)$$

но применяются и более сложные её виды. В работах [4, 6] приведены алгоритмы нахождения весовых коэффициентов  $\{w_j\}$  по обучающей выборке – матрице  $X$  и вектору  $Y$ . Если посредством подбора функций  $f_j(x_j)$  получить адекватную ММ (1) невозможно, используют пару персептронов, образующих элементарную нейросеть.

В данной работе помимо функции (9) показана возможность использования двухкомпонентной функции:

$$f_j(x_j) = w_{1j}x_j + w_{2j}(1-x_j), \quad j=1, \dots, m, \quad (10)$$

весовые коэффициенты которой  $w_{1j}$  и  $w_{2j}$  подбираются методом Монте-Карло [8] с использованием компьютерной программы *porog.exe*.

**3. Описание логических схем регрессионными моделями**

Третий способ построения ММ (1) ЛС заключается в применении регрессионного анализа [5]. В этом случае ММ (1) может быть получена в виде квазилинейного уравнения регрессии:

$$y = \sum_{k=1}^M b_k \Phi_k, \quad (11)$$

где  $b_k$  -  $k$ -й коэффициент регрессии;  $\Phi_k$  -  $k$ -й условный фактор, представляющий собой алгебраическую комбинацию ВФ (входов)  $x_1 \div x_m$ ;  $M < n$  – число компонентов уравнения (11).

В работе [5] условные факторы  $\{\Phi_k\}$  предлагалось определять форсированным перебором, а коэффициенты  $\{b_k\}$  – с использованием метода наименьших квадратов [9] по протоколу испытаний – матрице  $X$  и вектору  $Y$ , для чего была

разработана компьютерная программа *regran.exe*. Адекватность уравнения (11) оценивалась по двум критериям – по *F*-критерию Фишера [10] и максимальному рассогласованию  $\Delta$  между значениями ВП в векторе  $Y$  и вычисленными по уравнению регрессии (11).

Некоторые нюансы в следующем. Во-первых, одному и тому же протоколу испытаний (матрица  $X$  и вектор  $Y$ ) могут соответствовать несколько адекватных уравнений регрессии вида (11), но с различными условными факторами  $\{\Phi_{kj}\}$  и коэффициентами  $\{b_{kj}\}$ . Во-вторых, классический регрессионный анализ предполагает, что компоненты вектора  $Y$  должны подчиняться нормальному закону распределения непрерывных случайных величин [11], но двоичные «0-1» дискретные значения ВП в векторе  $Y$  подчиняются распределению Бернулли. Тем не менее, как показал опыт и как будет показано на примерах, это не препятствует построению адекватных уравнений регрессии вида (11).

**4. Примеры описания логических схем**

В качестве примеров математического описания ЛС вышеописанными способами рассмотрим на примере трёхвходовых ( $m=3$ ) схем при 7-и вариантах ВП  $Y_a \div Y_{ж}$  – см.рис.4.

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; Y_a = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; Y_b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; Y_{г} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; Y_{д} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; Y_e = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; Y_{ж} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Рис.4 Тестовые варианты трёхвходовых ( $m=3$ ) ЛС

1.Применительно к алгебраическому описанию ЛС с использованием выражения (4) получены выражения для определения величины ВП у при различных сочетаниях входов  $x_1, x_2$  и  $x_3$  – см. табл.1. При

необходимости по выражениям в правом столбце табл.1 можно воспроизвести структуру этих ЛС на основе логических элементов «И», «ИЛИ», «НЕ».

2.Наряду с алгебраическим способом по представленным на рис.4 обучающим выборкам были с использованием программы *porog.exe* получены описания некоторых ЛС (варианты «а», «в» и «д») в виде персептронов (рис.2) с простой весовой функцией (9) – см.рис.5. Здесь на каждом персептроне - ЛС для каждого входа ( $x_{ij}$  в скобках приведены коэффициенты  $w_{1j}$  ( $w_{2j}=0$ ).

Таблица 1 ММ (1) трёхвходовых ЛС согласно вариантов на рис.4

Вариант	$y=f(x_1, x_2, x_3)$
«а»	$y_a = 1 - x_1 - x_2 - x_3 + x_1x_2 + x_1x_3 + x_2x_3 - x_1x_2x_3 = (1-x_1)(1-x_2)(1-x_3)$
«б»	$y_b = x_1 - x_1x_2 - x_1x_3 + x_1x_2x_3 = x_1(1-x_2)(1-x_3)$
«в»	$y_v = 1 - x_1 - x_3 + x_1x_2 + x_1x_3 + x_2x_3 - 2x_1x_2x_3 = 1 - x_1(1-x_2-x_3+2x_2x_3)$
«г»	$y_r = 1 - x_1x_2 - x_1x_3 - x_2x_3 + 2x_1x_2x_3$
«д»	$y_d = 1 - x_3 + x_1x_2x_3 = 1 - x_3(1-x_1x_2)$
«е»	$y_e = 1 - x_3 - x_1x_2 + 2x_1x_2x_3 = (1-x_3)(1-x_2x_3) + x_1x_2x_3$
«ж»	$y_{ж} = 1 - x_1 - x_2 - x_3 + x_1x_2 + x_1x_3 + x_2x_3 = (1-x_1)(1-x_2-x_3) + x_2x_3$

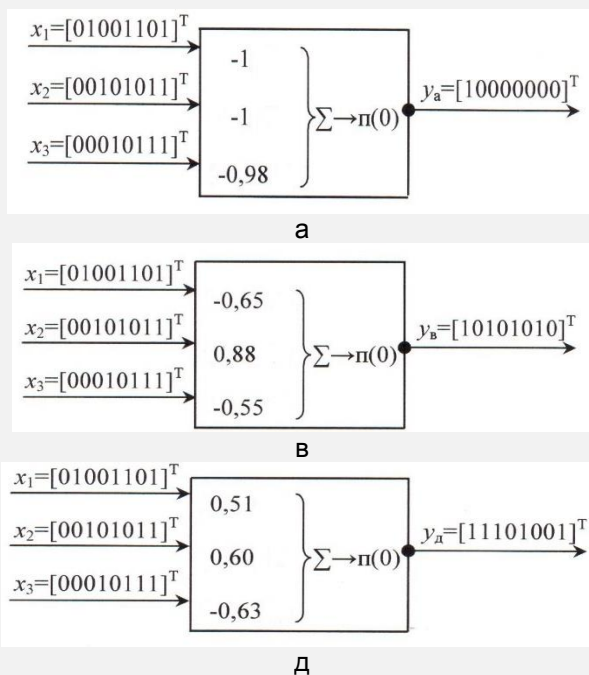


Рис.5 ЛС в виде персептронов с простой весовой функцией (9)

Найти простые весовые функции (9) для остальных вариантов обучающих выборок (рис.4) не удалось. В частности, для вариантов «б» и «д» были найдены двухкомпонентные весовые функции (10) – см.рис.6. Коэффициенты  $w_{1j}$  и  $w_{2j}$  приведены в скобках.

Варианты обучающих выборок «е» и «ж» стало возможным описать только парами персептронов, т.е. элементарной двухслойной сетью – рис.7. В частности, ЛС для варианта «е» может быть представлена как пара: персептрон варианта «д» и четырёхходовый персептрон, ВФ для которого являются  $x_1, x_2, x_3$  и выход из персептрона «д». Аналогично, ЛС варианта «ж» представляет собой персептрон варианта «а» и персептрон с входами  $x_1, x_2, x_3$  и  $Y_a$ .

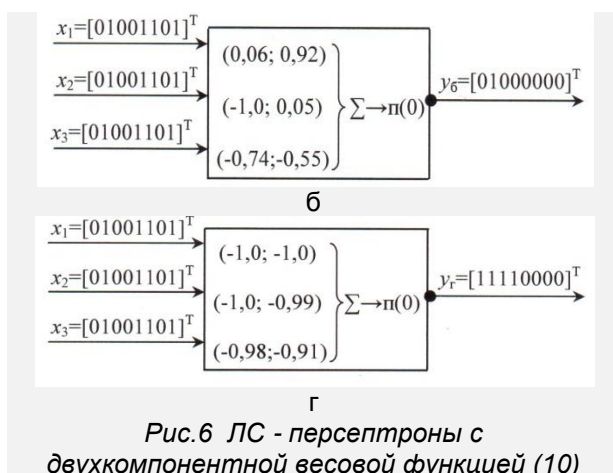


Рис.6 ЛС - персептроны с двухкомпонентной весовой функцией (10)

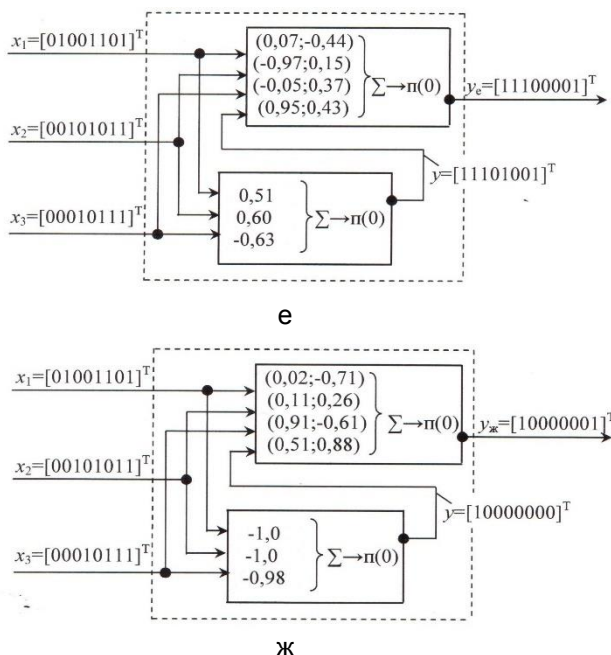


Рис.7 ЛС в виде элементарной двухслойной нейросети

Нетрудно видеть, что с помощью нейросетевого способа могут быть описаны и более сложные ЛС, чем на рис.4.

3.С использованием программы *regran.exe* был реализован и способ описания ЛС путём нахождения ММ (1) в виде уравнений регрессии (11) для тестовых протоколов испытаний на рис.4. В частности, для варианта «а» было получено адекватное уравнение регрессии:

$$y_{a1} = \frac{5,197 \cdot 10^{-3}}{\phi_1^2 (\phi_2 \phi_3)^3} - \frac{0,01032}{\phi_1 (\phi_2 \phi_3)^2}; \quad (12)$$

где

$$\phi_j = 0,5 + 1,5 \frac{x_j - \min_i^n x_{ji}}{\max_1^n x_{ji} - \min_1^n x_{ji}}, \quad j = 1, \dots, m -$$

преобразования ВФ (здесь  $n=8, m=3$ ).

Адекватность выражения (12) высока, что следует из критерия Фишера –  $F_{a1}=23970$  и максимального рассогласования –  $\Delta_{a1}=0,004$

Для варианта «б» получено сразу два адекватных уравнения регрессии:

$$y_{b1} = 1,989 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\phi_1}{\phi_2 \phi_3} \right)^3 - 3,302 \cdot 10^{-3} \frac{\phi_1}{\phi_2^{1,5}}, \quad (13)$$

$$y_{b2} = 0,02086 \left( \frac{\phi_1}{\phi_2 \phi_3} \right)^2 - 0,01997 \frac{\phi_1}{\phi_2^2 \phi_3} - 1,969 \cdot 10^{-3} \frac{\phi_1^2}{\phi_2 \phi_3^2}. \quad (14)$$

Величины критериев Фишера и максимальных рассогласований для уравнений (13) и (14) равны соответственно:  $F_{b1}=2187; \Delta_{b1}=0,014; F_{b2}=2384; \Delta_{b2}=0,015$ .

Для варианта «в» также получены два адекватных уравнения регрессии:

$$y_{v1} = 0,06533 \frac{\phi_2^{2,5}}{\phi_1^{2,5} \phi_3} - \frac{0,01063}{\phi_1^4} \left( \frac{\phi_2}{\phi_3} \right)^3 + \frac{0,1204}{\phi_3^3} \left( \frac{\phi_2}{\phi_1} \right)^{1,5}; \quad (15)$$

$$y_{v2} = \frac{3,752 \cdot 10^{-3}}{(\phi_1 \phi_3)^4} + 4,860 \cdot 10^{-3} \frac{(\phi_1 \phi_3)^3}{\phi_2^4} + 0,1657 \phi_1^2 \phi_2^3 \phi_3^2 - 0,1659 (\phi_1 \phi_3)^3 \phi_2. \quad (16)$$

Величины критериев Фишера и максимальных рассогласований для уравнений (15) и (16) равны соответственно:  $F_{v1}=50,9; \Delta_{v1}=0,12; F_{v2}=311,0; \Delta_{v2}=0,038$ .

Адекватное уравнение регрессии было получено и для варианта «г»:

$$y_{r1} = 3,552 \frac{\phi_2}{(\phi_1 \phi_3)^3} - \frac{0,04121}{\phi_1^4 \phi_2^3 \phi_3^4} - 1,767 \frac{\phi_2^2}{(\phi_1 \phi_3)^3} \quad (17)$$

Величины критериев Фишера и максимального рассогласования равны соответственно:  $F_{r1}=588,3$ ;  $\Delta_{r1}=0,031$ .

Для варианта «д» получено два адекватных уравнения регрессии:

$$y_{d1} = 1,364 - 0,7858\phi_3 + 0,07316\phi_1\phi_2\phi_3^2; \quad (18)$$

$$y_{d2} = 0,03053 \frac{\phi_1^2}{\phi_2^3} + \frac{2,921 \cdot 10^{-2}}{\phi_1^3 \phi_3^2} + 0,819 \cdot 10^{-3} \phi_1^3 \phi_2^2 \phi_3^3. \quad (19)$$

Величины критериев Фишера и максимальных рассогласований:  $F_{d1}=36,5$ ;  $\Delta_{d1}=0,13$ ;  $F_{d2}=87,2$ ;  $\Delta_{d2}=0,077$ .

Адекватное уравнение регрессии получено для варианта «е»:

$$y_{e1} = \frac{0,02934}{\phi_2^3 \phi_3^2} - 0,03456 \frac{\phi_2^3}{\phi_3^2} + 8,092 \cdot 10^{-3} \frac{\phi_2^2}{(\phi_1 \phi_3)^3} + 0,01661(\phi_1 \phi_2)^3. \quad (20)$$

Величины критерия Фишера и максимального рассогласования:  $F_{e1}=82,7$ ;  $\Delta_{e1}=0,074$ .

И, наконец, для варианта «ж» также получено адекватное уравнение регрессии:

$$y_{ж1} = \frac{3,889 \cdot 10^{-3}}{\phi_1^2 (\phi_2 \phi_3)^3} + 1,952 \cdot 10^{-3} (\phi_1 \phi_2 \phi_3)^3. \quad (21)$$

Величины критерия Фишера и максимального рассогласования:  $F_{ж1}=246,2$ ;  $\Delta_{ж1}=0,062$ .

Пересчитанные по выражениям (12)-(21) величины ВП  $Y$ , свидетельствующие о возможности нахождения ММ (1), связывающей входы и выходы ЛС, методами регрессионного анализа [7], имеют вид:

$$Y_{a1} = \begin{bmatrix} 1,0000 \\ 0,0006 \\ 0,0001 \\ 0,0001 \\ -0,0039 \\ -0,0039 \\ -0,0010 \\ -0,0003 \end{bmatrix}; Y_{b1} = \begin{bmatrix} 0,0112 \\ 0,9997 \\ -0,0003 \\ 0,0044 \\ 0,0136 \\ 0,0028 \\ -0,0006 \\ -0,0021 \end{bmatrix}; Y_{b2} = \begin{bmatrix} 0,0026 \\ 0,9997 \\ -0,0037 \\ -0,0148 \\ 0,0005 \\ 0,0026 \\ -0,0012 \\ -0,0037 \end{bmatrix};$$

$$Y_{b1} = \begin{bmatrix} 0,9239 \\ 0,1238 \\ 0,9920 \\ 0,0451 \\ 1,0510 \\ 0,0039 \\ 0,9956 \\ 0,0471 \end{bmatrix}; Y_{b2} = \begin{bmatrix} 0,9617 \\ 0,0193 \\ 1,0380 \\ 0,0193 \\ 0,9982 \\ -0,0006 \\ 0,9982 \\ 4,6 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix}; Y_{r1} = \begin{bmatrix} 0,9955 \\ 1,0050 \\ 0,9920 \\ 1,0050 \\ 0,0310 \\ 0,0196 \\ 0,0310 \\ 0,0005 \end{bmatrix};$$

$$Y_{d1} = \begin{bmatrix} 0,9760 \\ 0,9897 \\ 0,9897 \\ -0,1341 \\ 1,0450 \\ 0,0854 \\ 0,0854 \\ 0,9633 \end{bmatrix}; Y_{d2} = \begin{bmatrix} 0,9760 \\ 0,9925 \\ 0,9959 \\ 0,0603 \\ 1,0070 \\ 0,0773 \\ 0,0746 \\ 0,9938 \end{bmatrix};$$

$$Y_{e1} = \begin{bmatrix} 1,0510 \\ 0,9403 \\ 0,9970 \\ 0,0599 \\ 0,0045 \\ 0,0743 \\ 0,0192 \\ 0,9956 \end{bmatrix}; Y_{ж1} = \begin{bmatrix} 0,9956 \\ 0,0625 \\ 0,0158 \\ 0,0158 \\ 0,0166 \\ 0,0166 \\ 0,0159 \\ 0,9992 \end{bmatrix}.$$

### Заключение

Таким образом, в данной работе показана возможность построения математических моделей логических схем несколькими способами – алгебраическим, с использованием нейросетевых методов и регрессионного анализа. Приведены примеры применения указанных способов по тестовым выборкам (протоколам испытаний), показавшие действенность способов.

Наличие моделей логических схем может позволить решить ряд задач – восстановить структуру схемы на основе элементов «И», «ИЛИ», «НЕ», оценить помехоустойчивость логической схемы при поступлении на вход зашумлённых или ошибочных сигналов и т.п., что может быть рассмотрено в ходе дальнейших исследований.

Разработаны и эффективно использованы компьютерные программы для нахождения весовых функций персептрона и построения регрессионных моделей применительно к логическим схемам.



**Литература**

1. С.Спиди, Р.Браун, Дж.Гудвин. Теория управления. М. Мир, 1973. – 248 с.
2. СП 5 13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования (с изменениями).
3. С.И.Коваленко. Решение задач математической логики с использованием элементарной алгебры. М.: Физматлит, 2004. – 80 с.
4. М.Дертоузоc. Пороговая логика. М.: Мир, 1967. – 343 с.
5. А.А.Таранцев, О.В.Груданова, К.В.Погорельская, В.В.Яркин. Об оценке помехоустойчивости логических схем // Вестник СПбИ ГПС МЧС России, №2(9), 2005.
6. В.И.Комашинский, Д.А.Смирнов. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. М.: Горячая линия – Телеком, 2003. -94 с.
7. А.А.Таранцев. Регрессионный анализ и планирование испытаний в задачах принятия решений / Монография. СПб.: ИПТ РАН, 2017. – 174 с.
8. И.М.Соболь. Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1985.
9. Ю.В.Линник. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. Изд. 2-е. М.: Физматгиз, 1962.
10. Г.Корн, Т.Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Изд. 4-е. М.: Наука, изд-во Физматлит, 1978. – 831 с.
11. А.А.Таранцев. Случайные величины и работа с ними. Учебно-методическое пособие / Под ред. проф. В.С.Артамонова. Изд. 2-е, перераб. и доп. СПб.: ИД «Петрополис», 2011. – 160 с.

**References**

1. S.Spidi, R.Braun, Dj.Gudvin. Teoriya upravleniya. M.: Mir, 1973. – 248 s.
2. SP 5 13130.2009. Sistemy protivopozharnoy zashchity. Ustanovki pozharnoy signalizacii i pozharotusheniya avtomaticheskie. Normy i pravila proektirovaniya (s izmeneniyami).
3. S.I.Kovalenko. Reshenie zadach matematicheskoy logiki s ispol'zovaniem elementarnoy algebry. M.: Fizmatlit, 2004. – 80 s.
4. M.Dertouzos. Porogovaya logika. M.: Mir, 1967. – 343 s.
5. A.A.Tarantsev, O.V.Grudanova, K.V.Pogorel'skaya, V.V.Yarkin. Ob ocenke pomehoustoychivosti logicheskikh shem // Vestnik SPbI GPS MCHS Possii, №2(9), 2005.
6. V.I.Komashinsky, D.A.Smirnov. Neironnye seti i ih primenenie v sistemah upravleniya i svyazi. M.: Goriachaya liniya – Telekom, 2003. -94 s.
7. A.A.Tarantsev. Regressionny analiz i planirovanie ispytaniy v zadachah priniatiya resheniy / Monografiya. SPb.: IPT RAN, 2017. – 174 s.
8. I.M.Sobol'. Metod Monte-Karlo. M.: Nauka, 1985.
9. Yu.V.Linnik. Metod naimenshih kvadratov i osnovy teorii obrabotki nabliudeniya. Izd. 2-e. M.: Fizmatgiz, 1962.
10. G.Korn, T.Korn. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i injenerov. Izd. 4-e. M.: Nauka, izd-vo Fizmatlit, 1978. – 831 s.
11. A.A.Tarantsev. Sluchaynye velichiny i rabota s nimi. Uchebno-metodicheskoe posobie / Pod red. Prof. V.S.Artamonova. Izd. 2-e, pererab. i dop. SPb.: ID «Petropolis», 2011. – 160 s.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСОВ И  
КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ**

УДК 004.428.4

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ ПРЕПРОЦЕССОРА  
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА SIGMA ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
КОНСТРУКЦИЙ****Юрий Иванович Димитриенко**

доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Вычислительная математика и математическая физика»,  
директор научно-образовательного центра «Суперкомпьютерное инженерное моделирование и разработка  
программных комплексов»

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1  
e-mail: dimit@bmstu.ru

**Андрей Алексеевич Захаров**

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник научно-образовательного центра «Суперкомпьютерное инженерное  
моделирование и разработка программных комплексов»

доцент кафедры «Вычислительная математика и математическая физика»  
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1  
e-mail: azaharov@bmstu.ru

**Аннотация**

В работе описываются компьютерные технологии разработки препроцессора программного комплекса SIGMA для генерации блочно-структурированных адаптивных сеток. Приводятся способы автоматизированного компьютерного построения геометрий расчётных областей, используемые методы генерации и сгущения узлов сетки, алгоритмы работы с блочно-структурированными квазинепрерывными сетками для некоторых типов областей; алгоритмы генерации тетраэдральных сеток и сеток с элементами, центрированными относительно узлов исходных блочно-структурированных адаптивных сеток. Показываются разработанные интерфейсы для модуля редактора геометрии препроцессора SIGMA. Описывается структура и параметры настройки генератора сетки. Приводятся некоторые результаты генерации трехмерных адаптивных сеток для областей внешнего обтекания полусферы, обтекания высокоскоростного летательного аппарата типа Falcon HTV-2 и для области зазора между рулем и корпусом летательного аппарата. Делаются выводы о преимуществах предложенного подхода генерации адаптивных сеток по сравнению с существующими аналогами.

**Ключевые слова:** блочно-структурированные сетки; адаптивные сетки; конечно-разностные сетки; геометрическое моделирование; сгущение сеток; сложные области; тетраэдральные сетки; преобразование сеток; центрированные контрольные объемы;

**COMPUTER TECHNOLOGIES OF DEVELOPMENT OF PREPROCESSOR OF  
SIGMA SOFTWARE PACKAGE FOR STRUCTURAL MODELING****Yury I. Dimitrienko**

the professor, Dr.Sci.Phys.-Math.,  
the head of department of computational mathematics and mathematical physics and head of research and  
education center supercomputer engineering simulation and development of software packages

Bauman Moscow State Technical University  
2-nd Baumanskaya, 5, Moscow 105005, Russian Federation  
e-mail: dimit@bmstu.ru

**Andrey A. Zakharov**

Ph.D.Phys.-Math.,  
the senior researcher of research and education center supercomputer engineering simulation and development of  
software packages and associate professor of department of computational mathematics and mathematical physics  
Bauman Moscow State Technical University  
2-nd Baumanskaya, 5, Moscow 105005, Russian Federation  
e-mail: azaharov@bmstu.ru

### Abstract

The paper presents the technology of development of preprocessor of SIGMA software package to generate block-structured adaptive grids. It is described the methods of computer aided geometric design of domains, grid generation techniques, approaches to the grid concentration, methods of working with block-structured quasi-continuous grids for the certain types of curved domains, aspects of subdivision block-structured adaptive grids into tetrahedral elements and vertex-centered control volumes. It is shown the SIGMA preprocessor interfaces for geometry editor. It is described the structure and settings of the SIGMA preprocessor grid generator. It is given some results of the generation of three-dimensional adaptive grids for the domain of external flow near a hemisphere, flow around surface of the high-speed aircraft of Falcon HTV-2 type and for the domain of the gap between a wheel and body of an aircraft. It was determined some advantages of the proposed technology of adaptive grid generation in comparison with other approaches.

**Key words:** block-structured grid; adaptive grid; finite difference grid; geometric modeling; grid concentration; complex domain; tetrahedralization; mesh subdivision; vertex-centered control volumes; preprocessing

### Introduction

Development of unified computer-aided software packages for generating adaptive grids currently represents a large-scale problem of applied mathematics, computational physics, mechanics, biology and medicine [1,2]. Existing open-source and commercial software packages mainly use mesh generation methods that are universally applicable for complex geometry and focus on the generation of unstructured finite element or finite volume grids [3,4]. Structuring and adaptation of a mesh, as well as hexahedral shape of its cells, usually can be held only near some boundaries of the domain. At the same time, for some problems of mathematical physics (e.g. high-speed aerodynamics problems) it is important to hold the structuring and hexahedral shape of the mesh cells in the entire domain, the applicability of the mesh for finite difference methods, geometric and dynamic adaptation of the mesh in the entire domain. Therefore, quadrilateral and hexahedral mesh generation has become a topic of intense research [5,6].

Software package SIGMA is used for numerical solution of a wide range of problems in continuum mechanics (e.g. see [7-9]). It is developed by Computational Mathematics and Mathematical Physics Department of Bauman Moscow State Technical University. It includes a full set of modules that are required for the numerical simulation and has been successfully applied for solving different problems of continuum mechanics for over ten years. SIGMA preprocessor includes a three-dimensional geometric simulation module, which allows to generate a wide range of geometric shapes; a module, which allows to set properties, parameters and initial conditions and adaptive mesh generator.

Let us consider the methods and algorithms that underlie the preprocessor module.

### 1. Construction of Domain Geometries

For the generation of block-structured adaptive grids the equations of boundary curves and surfaces need to be written in parametric form. These equations are built on the spline interpolation methods, which are based on a created grid of control points. The control points of the domain are located on the boundary surfaces and form the structured surface mesh.

The SIGMA preprocessor module has a graphical interface that allows to create a computational domain visually. The domain is constructed from a set of initial hexahedral blocks (primitives) by their combining and subsequent deformation. The deformation is performed by changing of coordinates of control points of the primitives by entering them or reading from a file.

It is possible to load the incoming information about geometric shapes of bodies from the solid simulation software. In this case it is used the STL geometry definition file format. The functions for generation of points in given sections and along lines between the two specified points on a triangulated surface are implemented for the construction of the structured mesh of control points on the imported surfaces (fig. 1). Then the predetermined thickness curvilinear blocks are generated based on data about the normals in cells. Fig. 1 illustrates the process of importing the geometry from STL file, created grid of control points, view of the surface cubic splines and the curvilinear blocks construction.

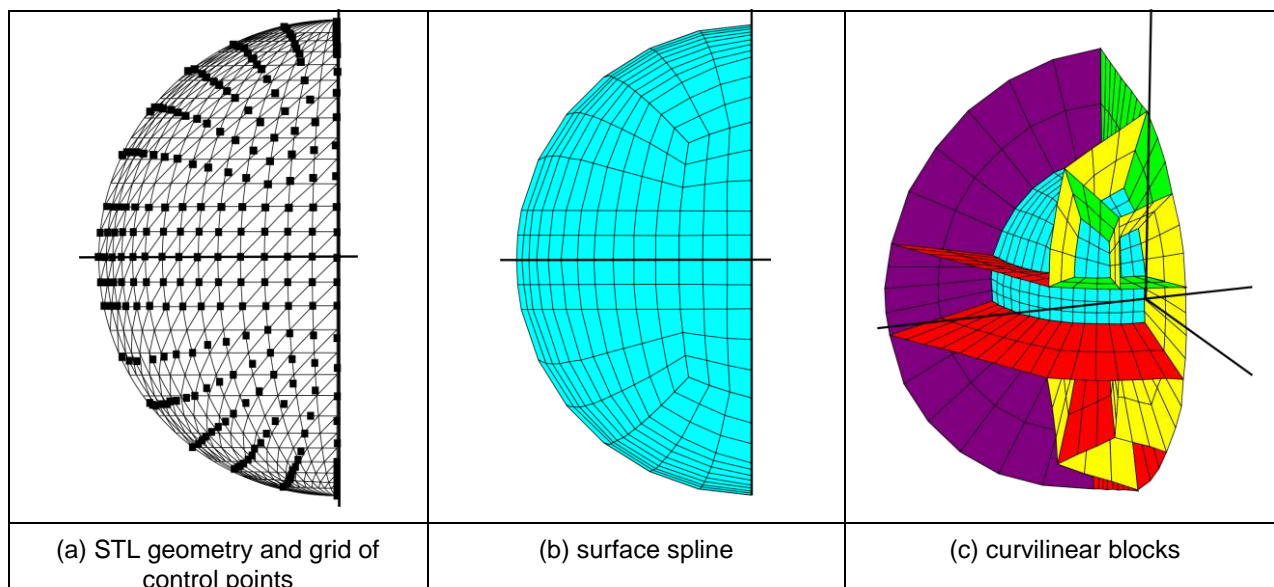


Fig. 1. Import of geometry and domain construction

2. Adaptive Grid Generation

2.1. Introduction of Adaptive Coordinates

A three-dimensional non-orthogonal coordinate system  $X^i, i=1,2,3$  is introduced to generate an adaptive mesh. In this coordinate system, the boundaries of each curvilinear block are the coordinate surfaces. To go to these coordinates, we use the algebraic transformation, which refers to the Lagrangian coordinate transformation of transfinite interpolation methods [1]. There are functions that allow to analytically find Jacobian matrix of the transformation, tangent and normal vectors at the boundary points.

Generally, it is impossible to build an acceptable global transformation from a single block. Therefore, an approach for the grid generation is that the blocks are generally six sided and one-to-one matching at the boundaries. One current requirement for this approach is that the assignments of the parameterizations and coordinate directions at the boundary surfaces should be matched.

2.2. Grid Concentration

A preliminary transformation of an initial uniform mesh into a nonuniform one is introduced to control the distribution of nodes near the boundaries. We use the functions to grid concentration in adaptive coordinates [1], which are based on the numerical solution of equations with a small parameter in the highest derivatives. In addition to using the standard parameters of these functions, there is an option to manually input a domain of concentration (for example, the boundary layer thickness). In this case, the parameters of concentration functions are found by solving the equations in accordance with the inputted values.

2.3. Generation of Block-Structured Quasi-Continuous Grids

It is impossible to ensure the continuity of adaptive coordinate lines for some computational domains; therefore, the introducing of additional internal discontinuities is necessary. The mesh nodes on these internal discontinuities are generated twice. The parameters of each of these nodes correspond to the parameters of the adaptive coordinate system in which it was generated. The physical coordinates of these nodes are the same. Each node has a link to its twin. There are different classes of geometry topologies with internal discontinuities in the preprocessor (fig. 2). The corner nodes with the extreme values of some adaptive coordinates are separately selected among twin nodes (fig. 2 (a) and (b)). Also, we separately select the nodes wherein the adaptive coordinate lines are closed (fig. 2 (c)).

Let the coordinate lines  $X^1$  and  $X^2$  of different adaptive coordinate systems (green and red on the fig. 2) are perpendicular to an internal discontinuity. If a derivative of a function at an ordinary node  $j$  is approximated by the central differences

$$\frac{\partial f}{\partial X^1} \approx \frac{f_{j_R} - f_{j_L}}{X^1_{j_R} - X^1_{j_L}}, \tag{1}$$

the derivative at a node  $j$  on the internal discontinuity can be approximated for example as follows

$$\frac{\partial f}{\partial X^1} \approx \frac{f_{j_R} - f_j}{X^1_{j_R} - X^1_j} + \frac{f_j - f_{j_D}}{X^2_{j_T} - X^2_{j_D}}. \tag{2}$$

Here  $j_R$  and  $j_L$  are the two neighbors of the node  $j$  in the direction  $X^1$ ,  $j_D$  is the neighbor of the twin  $j_T$  of the node  $j$  in the direction  $X^2$ .

Results of a solution are corresponded to only one of the two twin nodes. The second node is a subsidiary and its parameters are used only for the

calculations of the difference approximations and searching for the appropriate neighbors.

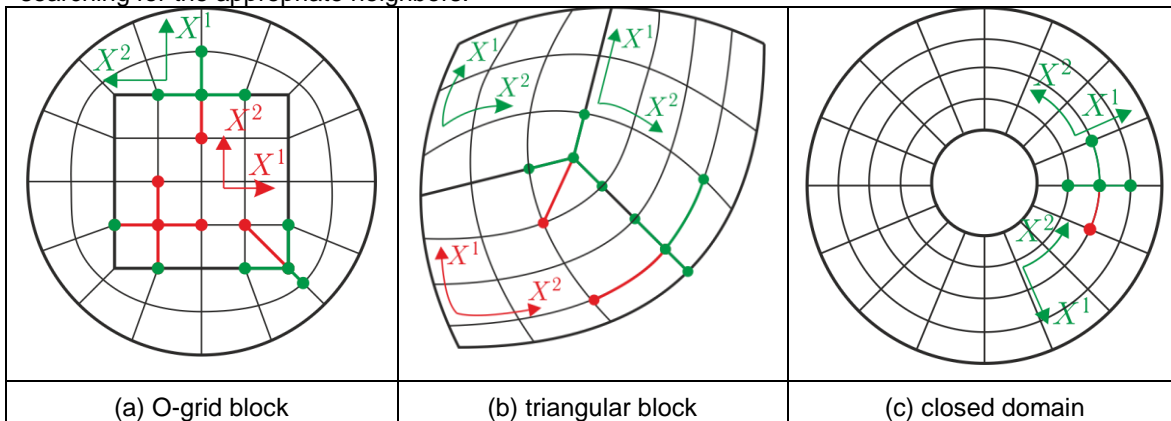


Fig. 2. Different classes of geometry topologies with internal discontinuities.

2.4. Generation of Tetrahedral Elements

The block-structured hexahedral mesh can be subdivided into a consistent set of tetrahedra for the using of tetrahedral finite element or finite volume solvers. There are exactly two possible configurations that lead to subdivisions into five tetrahedra and 46 into six tetrahedra. Therefore, the tetrahedralization leads to a larger number of elements (from five till six times). The subdividing algorithms are similar to the algorithms described in [10,11]. The adaptive grids retain adaptation grid lines to geometry borders and allow to obtain solutions of better quality than with grids generated by ordinary finite element mesh generators.

2.5. Generation of Vertex-Centered Control Volumes

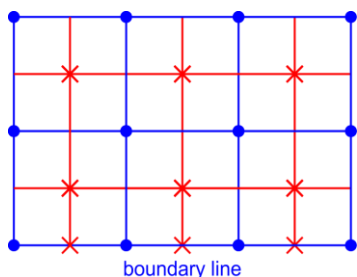


Fig. 3. Generation of vertex-centered control volumes

The elements centered on the mesh nodes (vertex-centered volumes [12]) are used by some finite volume methods to calculate the fluxes through the red facets between the corresponding values in the blue mesh nodes (fig. 3). The construction of these elements is based on the already generated adaptive mesh by finding the midpoints of elements. Despite the fact that the using of the control volumes centered on the mesh nodes requires about six times more memory as compared with the case where the control volumes coincide with the initial mesh cells, it allows to obtain more accurate results in the boundary layer due to a smaller mesh spacing in a

wall region. The "half" control volumes adjacent to the boundaries are used (fig. 3).

3. SIGMA Preprocessor Interface

The SIGMA preprocessor that allows to generate two-dimensional and three-dimensional adaptive grids has been developed based on the described algorithms. The preprocessor is written in C++ using the STL, Boost, OpenGL and OpenMP libraries. The preprocessor consists of two parts: the first is a geometry editor, and the second is a mesh generator.

The geometry editor has a graphical interface (fig. 4) that allows to visually create computational domains, select borders and subdomains for the definition of boundary and initial conditions and prepare data for a mesh generation.

When a user creates a primitive, the preprocessor requests its type, bounding box dimensions in adaptive and physical coordinate systems, as well as the number of control points for each coordinate direction. In accordance with the inputted values, the adaptive and physical coordinates of the control points are calculated. Later the user can edit these coordinates, as well as the primitive's dimensions. The preprocessor supports the ability to add and remove primitives, select a domain to zoom in on from the global view, translate and rotate of the domain. An inputted computational domain can be saved or load from a file.

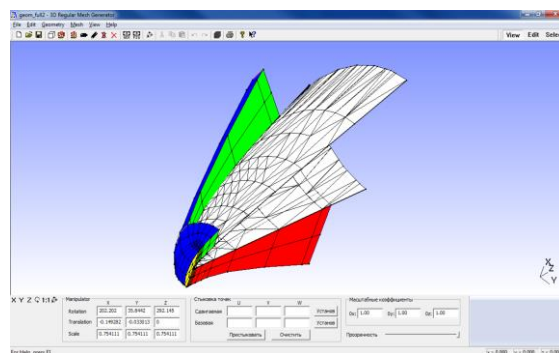


Fig. 4. SIGMA preprocessor interface

The mesh generator is a cross-platform console application. The domain geometry data and parameters of the generated mesh are transferred using the class serialization methods of Boost library. The data of classes are serialized in a XML file. The mesh generation parameters are the domain of mesh generation, the total number of partitions and the number of partitions in certain subdomains of the adaptive coordinate system, the mesh type and formats, the mesh data which will be calculated. A two-dimensional mesh can be generated in a given section of the adaptive coordinate system for a constructed three-dimensional domain.

#### 4. Examples of Grid Generation

Fig. 5-6 show some results of the generation of three-dimensional adaptive grids. We have generated the sufficiently coarse grids for easy viewing of their structures.

Fig. 5 shows the different types of grids for the domain of external flow near a hemisphere. For generation the block-structured hexahedral adaptive mesh the nine curvilinear blocks were constructed by the method described in sec. 1. They are shown in fig. 1 (c). The central block is located along the equator of the hemisphere. Two triangular O-grid blocks each consisting of the three common blocks are located on the forebody portion of the hemisphere above and below the central block. And the two remaining blocks are located behind the corresponding triangular blocks at the top and bottom of the central block. Fig. 5 (b)-(c) shows the possibility of converting the generated block-structured hexahedral adaptive mesh (fig. 5 (a)) into the finite element or finite volume grids.

Generally, each hexahedron is divided into five tetrahedra. In exceptional cases, if it is not possible to dock the adjacent elements by means of the division into five tetrahedra, the division into six tetrahedra may apply. An essential feature of the resulting tetrahedral mesh in comparison with those obtained by means of the most grid generators both open-source and commercial is that the grid lines are adjusted with the flow in the whole computational domain (see fig. 5 (b)). It makes it possible to select more precisely various features of the flow, such as shock waves, contact discontinuities and the depression waves. Fig. 5 (c) shows the red cells of the mesh consisting of vertex-centered control

volumes. Thus, these red cells are circumscribed around the nodes of the initial mesh shown in Fig. 5 (a). It is seen that for the corner nodes of O-grid blocks a hexahedral element is degenerated into a triangular prism. However, a calculation with such elements is not a significant problem for finite volume methods. It is evident also that the vertex-centered finite volume elements are smaller in size than the others near the boundaries.

Fig. 6 shows the block-structured adaptive grids for the real complex curvilinear computational domains: outer surface of the high-speed aircraft of Falcon HTV-2 type and for the domain of the gap between a wheel and body of an aircraft. The last domain has a local expansion near the flow inlet boundary to capture the shock wave. In such gaps, the mesh should be sufficiently fine to reach the necessary accuracy of the solution of temperature and heat flux fields.

An essential feature of all shown grids is that they were generated from not only one curvilinear blocks, but also their combination. It makes it possible to use them with finite-difference methods for complex curvilinear computational domains.

#### Conclusions

The computer technologies to generate block-structured adaptive grids have been developed. The generated grids can be two-dimensional, two-dimensional axisymmetric (in cylindrical coordinates) or three-dimensional. They are applied for the finite difference, finite element or finite volume methods. The developed computer technologies have been implemented in the SIGMA preprocessor that includes the modules of generation a wide range of three-dimensional geometric shapes, setting properties, parameters and initial conditions and adaptive mesh generator.

The main advantages of the proposed technologies of adaptive grid generation in comparison with other approaches are the structuring and hexahedral shape of the mesh cells in the complex curvilinear computational domains, the applicability of the mesh for finite difference methods, the adjusting grid lines with the flow in the whole domain.

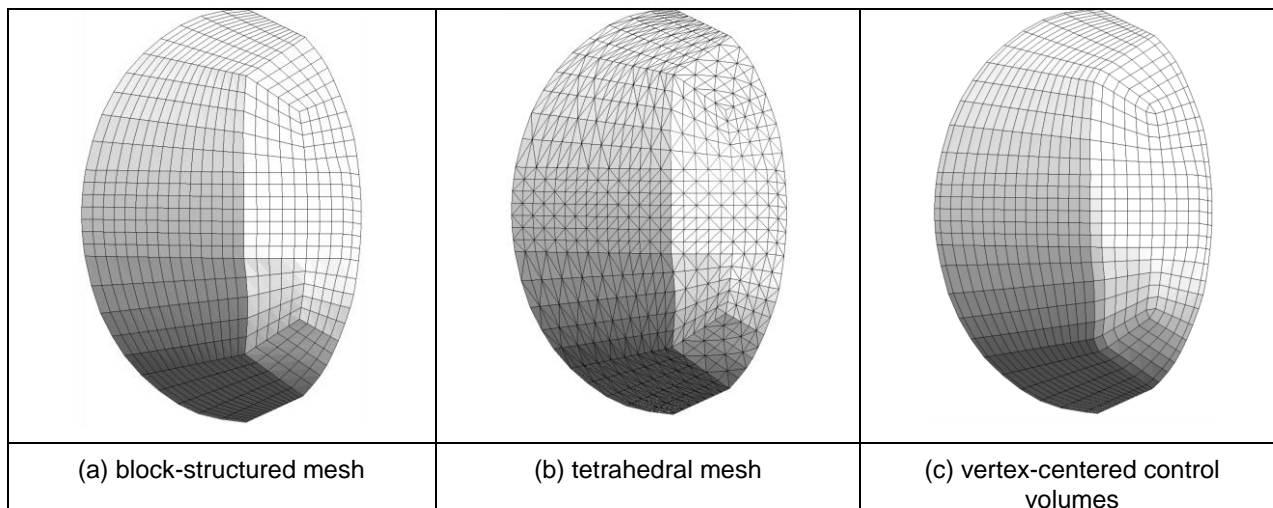


Fig. 5. Different types of grids for the domain of the external flow near a hemisphere

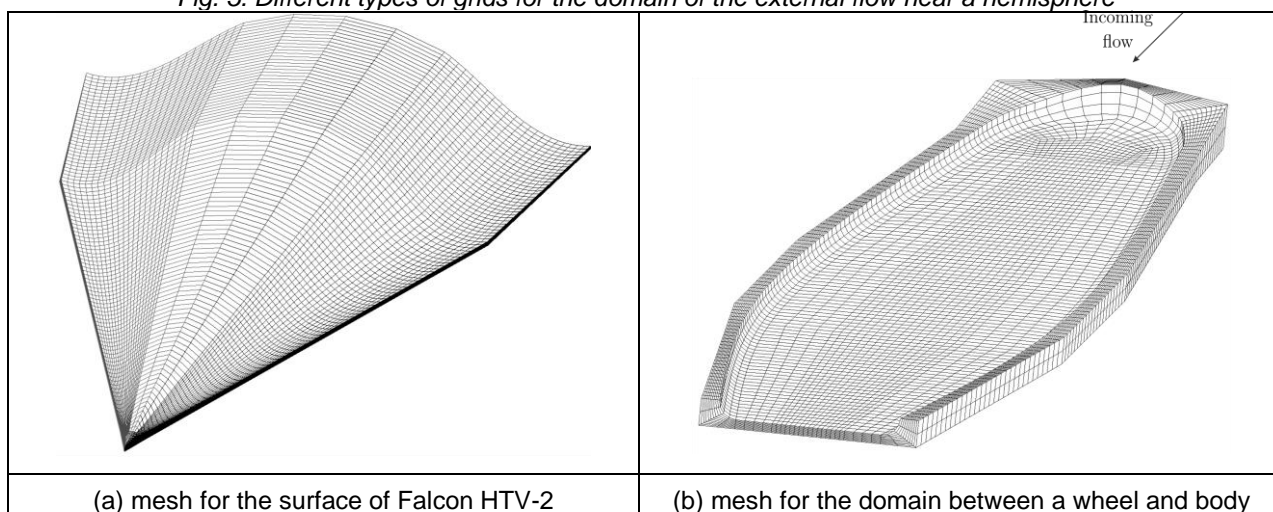


Fig. 6. Examples of generated block-structured adaptive grids

**Литература**

1. Лисейкин В.Д., Шокин Ю.И., Васева И.А., Лиханова Ю.В. Технология построения разностных сеток. Новосибирск, Наука, 2009. 419 с.
2. Farrashkhalvat M., Miles J.P. Basic Structured Grid Generation. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2003.
3. Geuzaine, C., Remacle, J.-F. (2009). Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. Journal for Numerical Methods in Engineering, 79(11), 1309-1331.
4. Si, H. (2015). TetGen, a Delaunay-Based Quality Tetrahedral Mesh Generator. ACM Trans. on Mathematical Software, 41(2), Article No. 11.
5. Schneiders, R. (1996). A Grid-based Algorithm for the Generation of Hexahedral Element Meshes. Engineering with Computers, 12, 168-177.
6. Thompson J.F., Soni B.K., Weatherill N.P. Handbook of grid generation. CRC Press, Boca Raton, 1999.
7. Dimitrienko, Yu. I., Koryakov, M. N., Zakharov, A. A. (2013). Computer Modeling of Couple External Gas Dynamic Processes and Internal Heat Transfer in Hypersonic Aircraft Constructions Using Software Package SIGMA. University Research Journal, 5, 127-134.
8. Dimitrienko, Yu. I., Koryakov, M. N., Zakharov, A. A. (2015). Application of Finite Difference TVD Methods in Hypersonic Aerodynamics. Lecture Notes in Computer Science, 9045, 161-168.
9. Dimitrienko, Yu. I., Koryakov, M. N., Zakharov, A. A. (2017). Computational Simulation of Conjugated Problem of External Aerodynamics and Internal Heat and Mass Transfer in High-Speed Aircraft Composite Constructions. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 6(1), 58-64.
10. Albertelli, G., Crawfis, R.A. (1997). Efficient subdivision of finite-element datasets into consistent tetrahedra. In: Yagel, R., Hagen, H. (Eds.) IEEE Visualization, Phoenix, AZ, 213-220.
11. Dompierre, J., Labbé, P., Vallet, M.G., Camarero, R. How to Subdivide Pyramids, Prisms and Hexahedra into Tetrahedra: 8th International Meshing Roundtable. Lake Tahoe, Californie, 1999.



12. Barth, T.J. (1994). Aspects of unstructured grids and finite-volume solvers for the Euler and Navier-Stokes equations. In: VKI Lecture Series. Belgium, Von Karman Institute for Fluid Dynamics. No. 1994-05. 152 p.

#### References

1. Liseikin V.D. Grid Generation Methods. Springer-Verlag, Heidelberg, 1999.
2. Farrashkhalvat M., Miles J.P. Basic Structured Grid Generation. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2003.
3. Geuzaine, C., Remacle, J.-F. (2009). Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *Journal for Numerical Methods in Engineering*, 79(11), 1309-1331.
4. Si, H. (2015). TetGen, a Delaunay-Based Quality Tetrahedral Mesh Generator. *ACM Trans. on Mathematical Software*, 41(2), Article No. 11.
5. Schneiders, R. (1996). A Grid-based Algorithm for the Generation of Hexahedral Element Meshes. *Engineering with Computers*, 12, 168-177.
6. Thompson J.F., Soni B.K., Weatherill N.P. Handbook of grid generation. CRC Press, Boca Raton, 1999.
7. Dimitrienko, Yu. I., Koryakov, M. N., Zakharov, A. A. (2013). Computer Modeling of Couple External Gas Dynamic Processes and Internal Heat Transfer in Hypersonic Aircraft Constructions Using Software Package SIGMA. *University Research Journal*, 5, 127-134.
8. Dimitrienko, Yu. I., Koryakov, M. N., Zakharov, A. A. (2015). Application of Finite Difference TVD Methods in Hypersonic Aerodynamics. *Lecture Notes in Computer Science*, 9045, 161-168.
9. Dimitrienko, Yu. I., Koryakov, M. N., Zakharov, A. A. (2017). Computational Simulation of Conjugated Problem of External Aerodynamics and Internal Heat and Mass Transfer in High-Speed Aircraft Composite Constructions. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 6(1), 58-64.
10. Albertelli, G., Crawfis, R.A. (1997). Efficient subdivision of finite-element datasets into consistent tetrahedra. In: Yagel, R., Hagen, H. (Eds.) *IEEE Visualization*, Phoenix, AZ, 213-220.
11. Dompierre, J., Labbé, P., Vallet, M.G., Camarero, R. How to Subdivide Pyramids, Prisms and Hexahedra into Tetrahedra: 8th International Meshing Roundtable. Lake Tahoe, California, 1999.
12. Barth, T.J. (1994). Aspects of unstructured grids and finite-volume solvers for the Euler and Navier-Stokes equations. In: VKI Lecture Series. Belgium, Von Karman Institute for Fluid Dynamics. No. 1994-05. 152 p.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ**

УДК 629.05

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ  
ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ПО ДАННЫМ ЕГО  
ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ****Александр Сергеевич Девятисильный**

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник  
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН  
690041, Владивосток, ул. Радио, 5  
e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

**Виктор Михайлович Гриняк**

доктор технических наук, доцент  
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса  
690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41  
e-mail: victor.grinyak@gmail.com

**Артем Владимирович Шурьгин**

младший научный сотрудник  
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН  
690041, Владивосток, ул. Радио, 5  
e-mail: artem.shurygin@bunjilabs.com

**Аннотация**

Работа выполнена в рамках исследований по интегрированным инерциально-спутниковым навигационным системам. В качестве составной части этих исследований рассматривается задача оценки производных непрерывной функции, ассоциированная с обратной траекторной задачей, целью решения которой декларируются оценки текущих значений кинематических параметров движения – местоположения, скорости, ускорения, рывка и т.п. Представлены методология, математические модели и алгоритмы бортовой интерпретации данных позиционирования подвижного объекта навигационной спутниковой системой ГЛОНАСС. Исследована проблема разрешимости задачи в условиях конечной точности вычислений и измерений, предложены процедуры, обуславливающие возможность устойчивого решения задачи. Рассмотрен нейросетевой алгоритм решения, в основу которого положена структура калмановского фильтра. Представлены результаты вычислительных экспериментов. Результаты ориентированы на решение проблем формирования маршрутных заданий и прецизионного управления объектами широкого скоростного диапазона и базирования.

**Ключевые слова:** интегрированная навигационная система, навигационная спутниковая система, траекторная задача, разрешимость задачи, кинематические параметры движения, нейросетевой алгоритм, математические модели, форма Земли.

**MODELS AND ALGORITHMS OF ESTIMATION OF THE KINEMATIC  
PARAMETERS OF THE OBJECT MOVEMENT BY ITS  
POSITIONING****Aleksandr S/ Devyatisilny**

Doctor of Engineering Sciences, the professor, Chief Researcher  
Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS  
Radio St., 5, Vladivostok 690041, Russian Federation  
e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

**Viktor M. Grinyak**

Assistant Professor  
Vladivostok State University Economics and Service  
Gogolya St., 41, Vladivostok 690014, Russian Federation  
e-mail: victor.grinyak@gmail.com

**Artem V. Shurygin**

Junior Researcher  
Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS  
Radio St., 5, Vladivostok 690041, Russian Federation  
e-mail: artem.shurygin@bunjilabs.com

**Abstract**

The article is devoted to research of integrated inertial-satellite navigation systems. As part of these researches, we consider the problem of estimating the derivatives of a continuous function associated with the inverse trajectory problem, the purpose of solving which is to estimate the current values of the kinematic parameters of motion – location, speed, acceleration, jerk, and so on. Methodology, mathematical models and algorithms for on-board interpretation of positioning data of a mobile object by the GLONASS navigation satellite system are presented. The solvability of the problem under conditions of finite accuracy of computations and measurements is investigated, procedures are proposed that stipulate the possibility of a stable solution of the problem. A neural network solution algorithm based on the structure of the Kalman filter is considered. The results of computational experiments are presented. The results are aimed to solving the problems of the formation of route tasks and precise control of objects with a wide speed range and basing.

**Key words:** integrated navigation system, navigation satellite system, trajectory problem, solvability of the problem, kinematic parameters of motion, neural network algorithm, mathematical models, the shape of the Earth.

**Введение**

Разнообразная и интенсивная деятельность человека на море и в околоземном пространстве (коммерческая навигация и решение вопросов оборонного значения, гидрографические и геофизические исследования, разведка полезных ископаемых и т.п.) может быть обеспечена только при условии высококачественного решения базовой задачи навигации – определения параметров движения, т.е. местоположения объекта навигации, его скорости, реже ускорения, а еще реже рывка. Немаловажным является и то, что знание параметров движения необходимо при оценке динамических и конструкционных характеристик подвижных объектов в процессе их ходовых испытаний и эксплуатации.

Выдающимся достижением в области навигационного обеспечения движения явилось создание первых низкоорбитальных навигационных спутниковых систем (НСС) в 60-е годы прошлого двадцатого столетия (Transit – США, Циклон – СССР). В нынешнем, двадцать первом, столетии наиболее широкое применение нашли среднеорбитальные НСС (типа GPS – США, ГЛОНАСС - Россия). В таких НСС для определения параметров траектории подвижного объекта могут быть реализованы различные методы [1], но в качестве базового, справедливо было бы указать на псевдодальномерный метод (дополненный, безусловно, известными методологиями компенсации погрешностей, вносимых источниками различной природы), весьма эффективно решающий проблему прецизионного оценивания координат местоположения объекта. В настоящей статье рассматриваются именно координаты места объекта в качестве исходной информации при конструировании бортовых (на объекте) алгоритмов оценивания других параметров траектории, из числа которых важнейшим является вектор скорости объекта относительно твердой Земли.

**1. Основные модельные представления**

Прежде всего, учитывая, что речь идет о навигации объектов в околоземном пространстве, причем главным образом о морских объектах и маловысотных объектах морского базирования, в

качестве опорной модели формы Земли естественно принять эллипсоид вращения (эллипсоид Клеро) с поверхностью (называемой уровенной), ортогональной направлению силы тяжести на спокойной поверхности Океана [2]. Соответственно этому введём эллиптическую (или геодезическую) систему отсчёта с координатами  $\{\varphi^e, \lambda^e, h\}$ , определяемую так [2], что  $\varphi^e$  и  $\lambda^e$  – широта и долгота (от Гринвича) местоположения объекта, а  $h$  – расстояние по нормам от поверхности эллипсоида. С подвижной точкой  $O_1$ , отождествляемой с подвижным объектом, свяжем декартову систему координат  $O_1\xi_1^e\xi_2^e\xi_3^e = O_1\xi^e$  с осями, ориентированными соответственно на Восток ( $O_1\xi_1^e$ ), Север ( $O_1\xi_2^e$ ), по нормали к поверхности эллипсоида ( $O_1\xi_3^e$ ). Введём также геоцентрическую систему отсчёта  $O\eta = O\eta_1\eta_2\eta_3$  (в системе ГЛОНАСС определяемую как ПЗ-90, а в системе GPS – как WGS-84 [1]) с началом в точке  $O$  (центр Земли), декартовыми координатами  $\{\eta_1, \eta_2, \eta_3\}$  и сферическими координатами  $\{\varphi, \lambda, r\}$ , где  $\varphi$  и  $\lambda$  – соответственно широта и долгота (от Гринвича) местоположения объекта,  $r$  – радиус точки  $\{\eta_1, \eta_2, \eta_3\}$ , т.е. длина отрезка  $OO_1$ . Связь между координатами  $\{\varphi, \lambda, r\}$  и  $\{\varphi^e, \lambda^e, h\}$  известна, а именно [2]:

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda^e; \\ b &= 1 - e^2 \sin^2 \varphi^e; \\ \operatorname{tg} \varphi &= \left[ 1 - \frac{ae}{a + h\sqrt{b}} \right] \operatorname{tg} \varphi^e; \\ r &= \left\{ \left[ \frac{a}{\sqrt{b}} + h \right]^2 \cos^2 \varphi^e + \left[ \frac{a(1 - e^2)}{\sqrt{b}} + h \right]^2 \sin^2 \varphi^e \right\}^{1/2}. \end{aligned}$$

С подвижной точкой  $O_1$  свяжем еще одну декартову систему координат  $O_1\xi_1\xi_2\xi_3 = O_1\xi$  с осями, ориентированными соответственно на Восток ( $O_1\xi_1$ ), Север ( $O_1\xi_2$ ), по радиус-вектору точки  $\{\eta_1, \eta_2, \eta_3\}$ , т.е.  $O_1\xi_3$ . Имеет место следующее ортогональное преобразование [2]:

$$\begin{aligned} \xi_1^e &= \xi_1; \\ \xi_2^e &= \cos(\varphi^e - \varphi) \xi_2 - \sin(\varphi^e - \varphi) \xi_3; \\ \xi_3^e &= \sin(\varphi^e - \varphi) \xi_2 + \cos(\varphi^e - \varphi) \xi_3. \end{aligned}$$

С учётом изложенного выше отметим, что, вообще говоря, всё равно, в какой из связанных с Землёй систем отсчёта решать навигационную задачу, вместе с тем результат интерпретации её решения неизбежно потребует более внимательного отношения к этой несложной проблеме. Например, если, в конечном итоге, обсуждаются скорости морских течений, то, очевидно, они должны быть представлены в касательных плоскостях эллипсоида.

Перейдём к модели траектории. Обратимся к подвижной системе отсчёта  $O_1\xi$ . В проекции на её оси вектор линейной скорости объекта относительно твердой Земли, т.е.  $V = (V_1, V_2, V_3)^T$ , определяется следующим образом:  $V_i = e_{ijk}\omega_k r_j = r_{ij}(i, k, j) = 1,3$ , где  $e_{ijk}$  – псевдотензор Леви-Чивиты;  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)^T$  – вектор угловой скорости вращения трёхгранника  $O_1\xi$  в проекциях на собственные оси:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= -\frac{d\varphi}{dt}; \\ \omega_2 &= \frac{d\lambda}{dt} \cos\varphi; \\ \omega_3 &= \frac{d\lambda}{dt} \sin\varphi; \end{aligned}$$

$r^v = (0, 0, r)^T$  – вектор местоположения объекта в проекциях на оси трёхгранника  $O\xi$ . Тогда  $d\varphi/dt = V_2/r$ ,  $d\lambda/dt = V_1/r \cdot \cos\varphi$ ,  $dr/dt = V_3$ . Отождествляя теперь покомпонентные составляющие скорости с полиномиальными степени  $n - 2$  функциями времени, определёнными на интервале, вообще говоря, произвольной длины  $\tau$ , модель эволюции геодезических сферических координат объекта можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1^{(i)}}{dt} &= \rho^{(i)}x_2^{(i)}; & x_1^{(i)}(t_0) &= x_{1,0}^{(i)}; \\ \frac{dx_2^{(i)}}{dt} &= x_2^{(i)}; & x_2^{(i)}(t_0) &= x_{2,0}^{(i)}; \\ &\vdots & & \\ \frac{dx_n^{(i)}}{dt} &= 0; & x_n^{(i)}(t_0) &= x_{n,0}^{(i)}; \end{aligned}$$

или в общем виде:

$$\frac{dx^{(i)}}{dt} = A^{(i)}x^{(i)}; \quad x^{(i)}(0) = x_0^{(i)}; \quad i = 1,2,3; \quad (1)$$

где индексы  $i = 1,2,3$  кодируют процессы, соответствующие  $\varphi(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $r(t)$ ,  $t \in [t_0, t_0 + \tau]$ ;  $x_1^{(1)} = \varphi$ ,  $x_1^{(2)} = \lambda$ ,  $x_1^{(3)} = r$ ,  $x_2^{(1)} = V_2$ ,  $x_2^{(2)} = V_1$ ,  $x_2^{(3)} = V_3$  и т.д.;  $\rho^{(1)} = 1/r$ ,  $\rho^{(2)} = -1/r \cos \varphi$ ,  $\rho^{(3)} = 1$ .

Полагая, что НСС доставляет потребителю (объекту) информацию в виде оценок его координат  $(\varphi, \lambda, r)$ , будем интерпретировать эти оценки как измерения, т.е.  $z^{(i)} = x_1^{(i)} + \varepsilon^{(i)}$ , или

$$z^{(i)} = Hx^{(i)} + \varepsilon^{(i)}, \quad i = \overline{1,3}; \quad (2)$$

где  $\varepsilon^{(i)}$  – погрешности оценок;  $H = (1, 0, 0)$ .

Легко видеть, что совокупность уравнений (1) и (2) может рассматриваться в качестве совокупности трёх схожих обратных задач типа «состояния – измерения», целью решения которых являются оценки векторов  $x^{(i)}$ , причем прежде всего их компонент  $x_2^{(i)}$ , т.е. составляющих вектора  $V$  скорости объекта.

Учитывая отмеченную схожесть задач, далее будем обсуждать только одну из них (как типовую с  $i = 1$ ), опуская в её записи индекс, т.е. задачу

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax; & x(0) &= x_0; \\ z &= Hx + \varepsilon; & \dim x &= n. \end{aligned} \quad (3)$$

Матрица  $A$  нильпотентна с индексом  $q = n$ , т.е.  $A^n = 0$ ; она имеет  $n - 1$  отличных от нуля элементов, а именно  $A_{1,2} = \rho$  и  $A_{i,j} = 1$  при  $i > 1$  и  $j = i + 1$ .

При численном решении сформулированной обратной задачи требуется обращение к дискретной модификации модели (3), которую, с учётом сказанного выше о матрице  $A$ , на интервале времени  $[t_k, t_{k+1}]$ ,  $t_{k+1} - t_k = \tau = \text{const}$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ , можно записать в виде

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \Phi_k(\tau)x_k; \\ z_{k+1} &= H_{k+1}x_{k+1} + \varepsilon_{k+1}, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \Phi_k(\tau)x_k; \\ z_{k+1} &= H_{p,k+1}x_{k+1} + \varepsilon_{k+1}, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\Phi_k(\tau) = \begin{pmatrix} 1 & \rho\tau & \frac{\rho\tau^2}{2!} & \dots & \frac{\rho\tau^{n-2}}{(n-2)!} & \frac{\rho\tau^{n-1}}{(n-1)!} \\ 0 & 1 & \tau & \dots & \frac{\tau^{n-3}}{(n-3)!} & \frac{\tau^{n-2}}{(n-2)!} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$H_{k+1} = H = (1, 0, \dots, 0),$$

$$H_{p,k+1} = H_{k+1}\Phi_k(\tau) = \left( 1, \rho\tau, \frac{\rho\tau^2}{2!}, \dots, \frac{\rho\tau^{n-1}}{(n-1)!} \right).$$

Представление (4) является точным по отношению к (3), если  $\rho = \text{const}$ , и тем точнее, чем меньше  $\tau$ , если  $\rho = \rho(t)$ ; вместе с этим следует особо отметить, что с уменьшением  $\tau$  неизбежно ухудшение разрешимости обратной задачи (по Адамару) в условиях конечной точности измерений и вычислений. Изменить ситуацию к лучшему можно, вводя процедуры преобразования переменных, приводящие к формам, независимым от  $\rho$  и  $\tau$ .

Здесь рассматриваются две такие процедуры (соответственно – два метода, две методологии, две технологии) – одноэтапная и двухэтапная.

Одноэтапная процедура выполняется в следующей последовательности:

1. Форматируется матрица наблюдаемости  $N_p$  для пары  $(H_p, \Phi(\tau))$  модели (4).
2. Определяются евклидовы нормы  $\|N_{p,i}\|$  столбцов  $N_{p,i}$  ( $i = 1, n$ ) матрицы  $N_p$ .
3. Формируется диагональная матрица  $D = \text{diag}(\|N_{p,1}\|, \dots, \|N_{p,n}\|)$  – матрица преобразования переменных  $x^q = Dx$ .
4. Модель (4) приводится к форме

$$\begin{aligned} x_{k+1}^q &= \Phi_k^- x_k^q; \\ z_{k+1} &= H_k^- x_k^q + \varepsilon_{k+1}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Phi_k^- = D \Phi_k(\tau) D^{-1}$ ,  $H_k^- = H_{p,k} D^{-1}$ .

5. Сравниваются числа обусловленности матриц наблюдаемости исходной модели (4) и полученной модели (5), т.е.  $\mu(N_p)$  и  $\mu(N_{pN})$ , где  $N_{pN} = N_p D^{-1}$ , и делаются выводы о рассмотренном преобразовании переменных.

Двухэтапная процедура учитывает особенность вида матрицы  $H_p$ . При изложении этой процедуры для наглядности примем  $n = 5$ . На первом этапе выполняется следующее:

1. Модель (4) с помощью преобразования  $f = D_f x$ , где  $D_f = \text{diag}(1, \rho\tau, \rho\tau^2/2!, \rho\tau^3/3!, \rho\tau^4/4!)$ , приводится к виду

$$\begin{aligned} f_{k+1} &= \Phi_{f,k} f_k; \\ z_{k+1} &= H_{f,k} f_k + \varepsilon_{k+1}, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\Phi_f = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & 3 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$H_f = (1,1,1,1,1).$$

2. Для пары  $(\Phi_f, H_f)$  строится матрица наблюдаемости

$$N_f = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 8 & 16 \\ 1 & 3 & 9 & 27 & 81 \\ 1 & 4 & 16 & 64 & 256 \\ 1 & 5 & 25 & 125 & 625 \end{pmatrix}.$$

3. Оценивается сингулярное число обусловленности  $\mu(N_f)$  и делается заключение о целесообразности решения обратной задачи (при заданном  $n$ ) уже на этом этапе; здесь заметим, что матрицы  $\Phi_f$  и  $N_f$  имеют специальный вид, а именно: матрица  $\Phi_f$  является верхнетреугольной с целочисленными элементами  $\Phi_{i,j} = 1$ ,  $\Phi_{1,j} = 1$ ,  $\Phi_{i+1,j} = \Phi_{i,j} + \Phi_{i+1,i}$  ( $i, j = 1, n$ ,  $i \geq j$ ), а матрица  $N_f$  состоит из целочисленных элементов  $N_{i,j} = i^{j-1}$ , ( $i, j = 1, n$ ).

На втором этапе, если он оказывается необходимым, выполняется еще одно преобразование переменных  $S_k = D_s f$ , где  $D_s =$

$\text{diag}(\|N_{f,1}\|, \dots, \|N_{f,n}\|)$ , при котором матрица  $N_f = N_s D_s$ , где  $N_s$  – матрица с единичными нормами столбцов. Учитывая далее, что  $N_p = N_f D_f = N_s D_s D_f$  и  $D = D_s D_f$  (что легко проверяется), находим, что  $N_s = N_{pN}$ , т.е.  $S_k = x_k^q$  и, таким образом, актуализируется модель (5).

Несмотря на то, что конечный результат обеих процедур, как видим, одинаковый, вторая из них более продуктивна, когда речь идет об исследовании сепаратного влияния параметров  $(\rho, \tau)$  и  $n$  («проклятие размерности») на разрешимость рассматриваемой задачи. Заметим, что число этапов в поставленной задаче можно увеличить, если, например, в качестве первого преобразования взять преобразование с матрицей  $D_p = \text{diag}(1, \rho, \dots, \rho)$ . Наконец, возможны и экзотические процедуры, когда переменные преобразуются по-разному, если актуальны какие-либо системные представления, отличные от придерживаемых здесь.

Некоторые результаты исследования проблемы «проклятия размерности» будут представлены несколько ниже в табл. 1.

Перейдём теперь к представлению алгоритма динамического обращения и остановимся на нейросетевой концепции [3], приняв за основу линейный динамический алгоритм (согласованный с моделями (4) и (5)) следующего вида:

$$\begin{aligned} y_{k+1} &= C_k y_k + K z_{k+1}; \\ y(0) &= y_0, \end{aligned}$$

где  $y_k$  – оценка вектора  $x_k^q$ ,  $x_k^{q*} = D^{-1} y_k$  – оценка вектора  $x_k$ ;  $C_k = \Phi_k^- - K_k H_k^-$ ;  $K_k = (K_1, \dots, K_n)^T_k$  – матрица (вектор) синаптических коэффициентов, настраиваемых так, чтобы достигался минимум квадратического критерия  $J_{k+1} = \|z_{k+1} - H_k x_k^*\|^2 + \|x_{2,k}^* - x_{2,k+1}^*\|^2 + \|x_{3,k}^* - x_{3,k+1}^*\|^2$  при обращении к ядерному механизму настройки [3], базирующегося на калмановской модели фильтрации [4], а именно:

$$\begin{aligned} K_{k+1} &= P_{k+1}^- (H_{k+1}^-)^T [H_{k+1}^- P_{k+1}^- (H_{k+1}^-)^T + R_{k+1}]^{-1}; \\ P_{k+1}^- &= \Phi_k^- P_k (\Phi_k^-)^T + Q_k^*; \\ P_{k+1} &= [E - K_{k+1} H_{k+1}^-] P_{k+1}^-; \\ P(0) &= P_0, \end{aligned}$$

где  $E$  – единичная матрица;  $(P_k, P_k^-)$  – матрицы, отождествляемые с дисперсионными (но, строго говоря, не являющиеся таковыми);  $R_k$  – положительно определённая матрица, отождествляемая с известной интенсивностью шумов измерения (в нашем случае – это заданная скалярная величина);  $Q_{k+1}^* = \arg \min_Q J_{k+1}$ ,  $Q$  – положительная диагональная матрица; при этом механизм настройки синаптических коэффициентов  $K$  на каждом шаге отождествляется с решением экстремальной задачи  $J_{k+1}^* = \min_{Q \in Q} J_{k+1}$ , над полем  $N_Q = 3^n$  значений  $J$  (например, при  $n = 5$ ,  $N_Q = 242$ ).

**2. Вычислительный эксперимент**

Основная цель численных исследований – это верификация особенностей и эффективности представлений, изложенных выше.

Обратимся к табл. 1 и отметим следующее: пробные реализации алгоритмов динамического обращения рассматриваемой обратной задачи в исходных (физических) переменных (модель (4)) показали их несостоятельность в используемой вычислительной среде с конечной относительной точностью ( $\epsilon_0 = 2,2 \cdot 10^{-16}$ ) представления чисел, что объяснимо большими значениями чисел обусловленности матриц наблюдаемости ( $\mu(N_p)$ ) при актуальных значениях  $t \leq 1$ . Преобразование переменных с неизбежностью приводит к новой модели задачи (5) со значительно лучшей её обусловленностью ( $\mu(N_{pN}) \ll \mu(N_p)$ ) и, как следствие, устойчивому и эффективному по точности её решению (см. рис. 1-4). Вместе с тем обращает на себя внимание и то, что сам процесс численного преобразования переменных и вычисления чисел обусловленности в среде с ограниченной точностью представления чисел в ней с ростом  $n$  приводит к заметным искажениям значений этих важнейших показателей разрешимости задачи («проклятие размерности»), что хорошо видно по таблице при  $n = 19$  и  $n = 20$ , когда нарушается очевидное из ранее изложенного свойство независимости нормированных матриц, а следовательно, и их чисел обусловленности  $\mu(N_{pN})$ ,  $\mu(N_f)$  и  $\mu(N_s)$  от значений  $t$ , а также равенство  $\mu(N_{pN}) = \mu(N_s)$ ; в таблице  $t_1 = 0,2c$  и  $t_2 = c$ .

n	$\mu(N_p, t_1)$	$\mu(N_p N, t_1)$	$\mu(N_f, t_1)$	$\mu(N_s, t_1)$
	$\mu(N_p, t_2)$	$\mu(N_p N, t_2)$	$\mu(N_f, t_2)$	$\mu(N_s, t_2)$
2	6.3710e+0 7	6.1623	6.8541	6.1623
	1.2742e+0 7	6.1623	6.8541	6.1623
3	7.2795e+0 8	39.0077	70.9231	39.0077
	6.0844e+0 7	39.0077	70.9231	39.0077
4	8.0047e+0 9	262.9437	1.1710e+0 3	262.9437
	2.2291e+0 8	262.9437	1.1710e+0 3	262.9437
5	8.7781e+1 0	1.8524e+0 3	2.6170e+0 4	1.8524e+0 3
	7.4783e+0 8	1.8524e+0 3	2.6170e+0 4	1.8524e+0 3
10	1.3968e+1 6	4.1966e+0 7	2.1063e+1 2	4.1966e+0 7
	2.4634e+1	4.1966e+0	2.1063e+1	4.1966e+0

	1	7	2	7
19	3.3225e+2 5	4.0542e+1 5	2.8640e+2 6	4.0793e+1 5
	1.0438e+1 6	4.0431e+1 5	5.1125e+2 4	4.0507e+1 5
20	3.7743e+2 6	2.9984e+1 6	1.4788e+2 6	2.9904e+1 6
	7.5995e+1 6	3.0201e+1 6	3.3490e+2 6	3.0396e+1 6

На рис. 1, 2 представлены некоторые результаты имитационного численного эксперимента при  $n = 5$  и  $t = 0,2c$ , проводимого для северной широты  $\varphi = 45^\circ$  и скорости движения объекта  $|V| = 100m/c$ . Наблюдаемое время движения объекта,  $0 \leq t \leq 3600$ , разбито на три подинтервала: на первом,  $0 \leq t < 1000$ , и третьем,  $2080 < t \leq 3600$ , объект движется прямым истинным курсом  $\psi = 45^\circ$ , на втором,  $1000 \leq t \leq 2080$ , с рысканьем  $-\psi = 45^\circ + 5^\circ \cos(2\pi t / T)$ ,  $T = 360c$ . С достаточностью, обоснованной ранее, результаты эксперимента представляются только для северных элементов движения. Погрешность позиционирования ГЛОНАСС распределена равномерно на интервале  $[-\sqrt{3}m, \sqrt{3}m]$ , так что её среднеквадратическое значение (СКП)  $\sigma_\epsilon = 1m$ . При этом СКП погрешностей оценок, представленных на рисунках имеют следующие значения: для положения  $-\sigma_\varphi = 1,2 \cdot 10^{-8}$  град. (0,06 м); для скорости ( $V_2$ ) на прямых курсах  $\sigma_v = 0,019m$ , при рыскании  $-\sigma_v = 0,090m$ ; для ускорения на прямых курсах  $\sigma_a = 0,003 m/c^2$ , при рыскании  $\sigma_a = 0,01 m/c^2$ .

На рис. 3 представлен процесс настройки элементов диагональной матрицы Q и на рис. 4 представлена эволюция функционала J. Настройка прекращена в момент времени  $t = 168,8c$ , и далее алгоритм работает при постоянных значениях вектора синаптических коэффициентов  $K = (9,19 \cdot 10^{-2}; 6,55 \cdot 10^{-3}; 2,26 \cdot 10^{-4}; 4,04 \cdot 10^{-6}; 3,2 \cdot 10^{-8})^T$ .

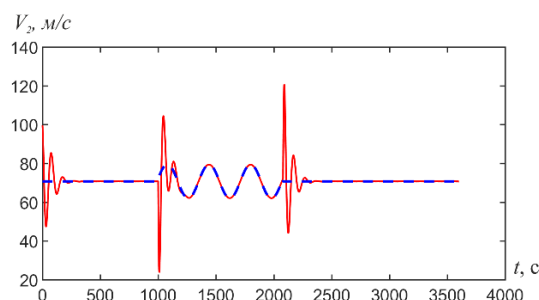


Рис. 1. Графики значений оценки (сплошная линия) и истинной (пунктирная линия) скорости  $V_2$

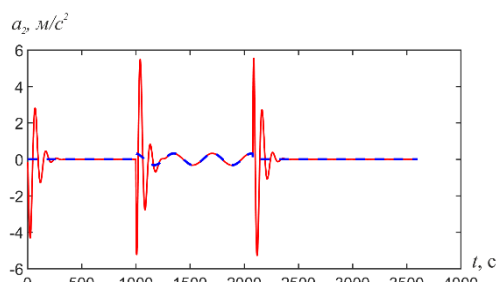


Рис. 2. Графики значений оценки (сплошная линия) и истинного (пунктирная линия) ускорения  $a_2 = dV_2/dt$

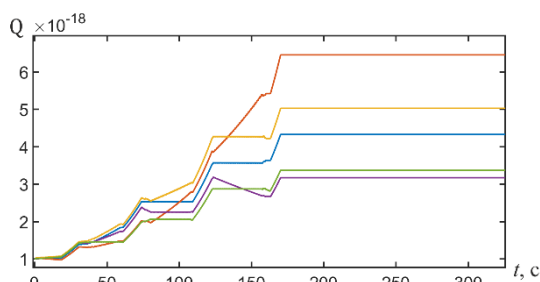


Рис. 3. Графики настройки элементов матрицы Q

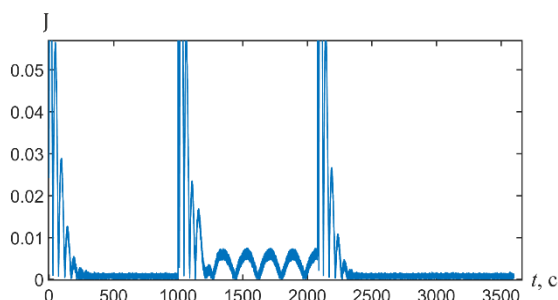


Рис. 4. График эволюции значений J

Учитывая, что при проведении некоторых исследований на море требуются небольшие скорости движения носителей, укажем значения СКП погрешностей оценок при  $|V| = 2$  м/с, сохраняя прежние условия эксперимента. Имеем:  $\sigma_\varphi = 2,2 \cdot 10^{-8}$  град. (0,10м); на прямом курсе  $\sigma_v = 0,06$  м/с; при рысканье  $\sigma_v = 0,07$  м/с.

Наконец, для больших скоростей, поступая аналогично предыдущему, имеем (при  $|V| = 300$  м/с)  $\sigma_\varphi = 2,2 \cdot 10^{-8}$  град. (0,10м); на прямом курсе  $\sigma_v = 0,08$  м/с; при рысканье  $\sigma_v = 0,09$  м/с

Заметим, что общий вид графиков во всех указанных случаях сохраняется тем же, что и на рис. 1-4.

### Заключение

В статье получены следующие результаты: разработаны математические, аналитические и численные модели для оценки параметров движения объекта; методология исследования разрешимости навигационной задачи с учетом ограниченной точности представления чисел в вычислительной среде и измерений; нейросетевой алгоритм для решения задачи; вычислительные эксперименты и анализ которых обнаруживают высокий потенциал навигационной информации, доставляемой спутниковой навигационной системой, необходимой при создании интегрированных навигационных систем.

### Литература

1. Перов А. И., Харисов В. Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. М.: Радиотехника, 2005. С. 688.
2. Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации. Автономные системы. М.: Наука, 1966. 580 с.
3. Девятисильный А. С. Модель нейросетевой инерциально-спутниковой навигационной системы с функцией оценки градиента напряженности гравитационного поля Земли // Журнал технической науки. 2016. Т. 86, № 9. С. 20-23.
4. Медич Дж. Статистические оптимальные линейные оценки и управление. М.: Энергия, 1972. С. 440.

### References

1. Perov A. I., Harisov V. N. GLONASS. Principy postroenija i funkcionirovanija. M.: Radiotehnika, 2005. S. 688.
2. Andreev V. D. Teorija inercial'noj navigacii. Avtonomnye sistemy. M.: Nauka, 1966. 580 s.
3. Devjatisil'nyj A. S. Model' nejrosetevoj inercial'no-sputnikovoj navigacionnoj sistemy s funkciej ocenki gradienta naprjzhenosti gravitacionnogo polja Zemli // Zhurnal tehnicheckoj nauki. 2016. T. 86, № 9. S. 20-23.
4. Medich Dzh. Statisticheskie optimal'nye linejnye ocenki i upravlenie. M.: Jenergija, 1972. S. 440.



**ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ**

УДК 519.6, 656.052, 639.2

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РАДАРА РЫБОЛОВНОГО ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА SRTM****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 состав рыболовного тренажерного комплекса помимо радара входят множество различных модулей имитации. В условиях конечных вычислительных ресурсов необходимо минимизировать вычислительные затраты и распределять нагрузку на различные вычислительные ресурсы такие, как центральный и графический процессоры. Для правильной имитации радара необходимо выполнять трассировку луча его излучателя с учетом высот в любой точке поверхности в зоне действия радара. Данные о рельефе могут быть получены из различных источников, например, с использованием электронных карт SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). В статье описана математическая модель трассировки луча радара, метод получения данных из карт SRTM, эффективные реализации имитационных алгоритмов на центральном и графическом процессорах. Описаны структуры внутренних данных. Представлен программный код участка алгоритма на языке C++ и результат его работы в виде карты участка Балтийского моря с наложенным изображением, «видимым» радаром.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, радар, модели рельефа SRTM, алгоритм Брезенхема, CPU, GPU, шейдер

**SIMULATION MODELING OF A RADAR FOR A FISHING GEAR SIMULATOR USING DIGITAL ELEVATION SRTM MODELS****Alexander A. 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 O. Razhev**

research scholar of the Industrial Fisheries of Department  
Kaliningrad State Technical University  
236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1  
e-mail: progacpp@live.ru

**Abstract**

In addition to the radar, a fishing gear simulator includes a lot of different simulation modules. In the context of finite computing resources, it is necessary to minimize computational costs and distribute the load upon various computing resources, such as central and graphics processors. In order to properly simulate the radar, it is necessary to trace the ray of its radiator taking into account the heights at any point of the surface in the radar's coverage area. Data on the relief can be obtained from various sources, for example, using SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) electronic charts. The article describes a mathematical model of radar ray tracing, method of obtaining data from SRTM charts, effective implementation of simulation algorithms on the central and graphics processors. The structures of internal data are described. A software code the algorithm part in C ++ is presented with

the result of its work in the form of a map of the Baltic Sea region with a superimposed image, a "visible" radar.

**Keywords:** simulation modeling, radar, elevation SRTM models, Bresenham's line algorithm, CPU, GPU, shader

**Введение**

Системы автоматизированного проектирования и различные тренажерные комплексы широко используются в различных отраслях промышленности, в том числе и морских. В морском и речном флоте тренажерные комплексы используются как в процессе проектирования и эксплуатации, так и для подготовки специалистов и береговой охраны.

В состав рыболовного тренажерного комплекса [1] помимо радара входят множество различных модулей имитации таких, как имитаторы управления движением судна, рыболовного оборудования, палубной команды, орудия и объекта лова, окружающей среды, а также другого навигационного оборудования.

**1. Цель и задачи**

В условиях конечных вычислительных ресурсов необходимо минимизировать вычислительные затраты каждого из алгоритмов имитации. Особенно это имеет место при работе программного обеспечения тренажера на ЭВМ с ограниченными ресурсами, например, на персональном компьютере.

Также при разработке алгоритмов имитации необходимо грамотно, в зависимости от текущих потребностей, распределять нагрузку на различные вычислительные ресурсы такие, как центральный (CPU) и графический процессоры (GPU). В связи с этим рекомендуется разрабатывать несколько версий алгоритмов для процессоров различного типа, в которых различные блоки способны взаимодействовать друг с другом на разных вычислительных ресурсах.

Основной функцией имитатора радара является отображение на экране дисплея окружающей судно обстановки с учетом окружающих препятствий, целей и рельефа поверхности. Для правильной имитации необходимо выполнять трассировку луча излучателя радара с учетом высот в любой точке поверхности в зоне действия, определяемой его характеристиками. Луч радара распространяется практически прямолинейно. При этом цели и препятствия могут закрывать друг друга. Отображаться должны только те цели и участки поверхности, которые попадают в зону видимости радара.

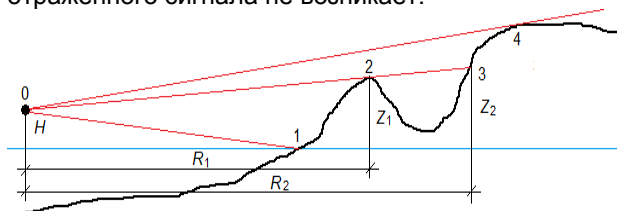
В процессе имитации цели могут быть статически заданы либо динамически генерироваться другими модулями тренажера. Рельеф же поверхности должен соответствовать натурному месту лова.

**2. Материалы и методы**

Данные о рельефе могут быть получены из различных источников, например, с использованием электронных карт SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), которые находятся в свободном доступе [2]. SRTM карты доступны в растровом формате GeoTIFF и могут быть конвертированы в данные о высотах специальными утилитами, например, бесплатной 3DEM Terrain Visualization.

Один из форматов данных о высотах является двоичный растровый формат. В нем данные структурированы в двумерный массив (матрицу), каждый элемент которой представляет собой значение высоты над уровнем моря в четырехбайтном формате чисел с плавающей точкой одинарной точности стандарта IEEE 754 [3]. Размеры и GPS-координаты участка хранятся в отдельном текстовом файле в формате ASCII [4].

Рассмотрим математическую модель трассировки луча радара. В вертикальной плоскости, проходящей через антенну радара [5] (точка 0 на рис. 1), луч, доходя до поверхности суши между точками 1 и 2 отражается. Отраженный сигнал улавливается приемником радара как препятствие. Аналогично между точками 3 и 4. Наоборот, между точками 2 и 3 возникает «мертвая» зона (см. рис. 1). Поэтому отраженного сигнала не возникает.



*Рис. 1. Математическая модель трассировки луча радара*

На рисунке 1 введем обозначения:  $R_1$  - расстояние между радаром и точкой 2;  $R_2$  - расстояние между радаром и точкой 3;  $Z_1$  - высота точки 2 над уровнем моря;  $Z_2$  - высота точки 3 над уровнем моря;  $H$  - высота антенны радара над уровнем моря.

Для точек 1 и 2 выполняется равенство:

$$\frac{Z_1 - H}{R_1} = \frac{Z_2 - H}{R_2} \tag{1}$$

Перегруппировав члены в (1) получим:

$$Z_2 - H = \frac{R_2}{R_1}(Z_1 - H) \tag{2}$$

По формуле (2) можно определять минимальную высоту препятствия  $Z_2$ , фиксируемого радаром, при заданном его

удалении от впереди стоящего препятствия с высотой  $Z_1$ .

Поскольку величина  $H$  постоянна в течение всего процесса моделирования для уменьшения количества операций перед процессом моделирования от значений всех высот рельефа можно вычесть  $H$ . Тогда выражение (2) можно преобразовать в:

$$Z_2' = \frac{R_2}{R_1} Z_1' \quad (3)$$

где  $Z_1'$  и  $Z_2'$  – скорректированные высоты.

В горизонтальной плоскости дискретизуем изображение по прямоугольной регулярной сетке согласно разрешению его дисплея. Зададим такой размер сетки, чтобы область отображения полностью входила в сетку.

В процессе сканирования луч радара описывает окружность (или прямоугольник) области отображения. Для заполнения всех узлов сетки при обходе периметра окружности (прямоугольника) необходимо выбрать шаг по периметру равным шагу сетки.

Создадим массив отрезков с началом в точке расположения радара и концом на периметре. Каждый элемент массива состоит из массива координат растровых точек отрезка (точек на сетке дискретизации) и расстояния точки до радара.

В случае, когда судно неподвижно относительно сетки на дисплее радара, массив параметров точек раstra отрезков строится однократно после смены масштаба отображения. Поэтому трудоемкость данной операции не критична для процесса моделирования. Для построения массива можно использовать однопоточный алгоритм для центрального процессора. В случае, когда судно движется относительно сетки, есть два варианта:

1. при заполнении массива отрезков увеличить линейные размеры охватываемой области вдвое (площади в 4 раза), а в процессе моделирования выполнять проверку попадания каждой точки раstra в область отображения (выполнять отсечение);
2. обновлять массив отрезков на каждом шаге процесса моделирования.

Первый вариант эффективнее при моделировании на центральном процессоре, так как процесс создания массива отрезков на нем имеет большую трудоемкость по сравнению с процессом отсечения. Для моделирования же на графическом процессоре предпочтительнее второй вариант, так как процесс растеризации выполняется аппаратным способом и одновременно для множества отрезков. К тому же необходимо корректировать размеры массивов на этапе их построения, что приведет к их различному размеру и, в виду особенностей вычислений на GPU, снизит эффективность. Альтернативой может служить аппаратное отсечение точек раstra посредством GPU на заключительной стадии построения изображения,

но в этом случае объем вычислений возрастает в 4 раза.

Рассмотрим оба варианта подробнее. Для растеризации отрезков на CPU можно использовать алгоритм Брезенхема [6]. При этом удаление до радара  $R$  вычислять для каждой точки и заносить в массив точек вместе с ее координатами. Началом каждого отрезка должен быть центр охватываемой области. Координаты концов отрезка вычисляются обходом периметра области по направлению вращения радара с шагом в одну точку раstra.

Для растеризации на GPU можно использовать его графический конвейер и аппаратные блоки растеризации [7,8]. Для уменьшения межпроцессорного обмена координаты концов отрезков и значение удаления от радара  $R$  создавать на конвейере геометрическим шейдером [8]. Значения  $R$  на концах каждого отрезка константны, известны и, в случае круглой области, одинаковые для каждого отрезка. Их можно задавать как  $Z$ -координату конца отрезка. При этом при растеризации значения  $R$  для промежуточных точек будут вычислены при помощи линейной интерполяции. Формирование массивов отрезков можно реализовать пиксельным шейдером [8].

Для отображения препятствий и целей на дисплее радара необходимо на каждом временном шаге формировать растровый буфер на основе информации о высотах и расстояниях до радара в каждой его точке. Для этого, с учетом текущего смещения, каждая точка раstra в координатах дисплея совмещается с соответствующими точками масштабированной растровой карты высот, с подвижными, статическими целями и препятствиями. Далее, для каждого элемента массива отрезков с информацией о расстоянии до радара последовательно, начиная от его начала, выполняется преобразование алгоритмом, исходный код которого на языке C++ [9] выглядит следующим образом:

```
float z = Z[L[k][1].y][L[k][1].x];

for(int i = 2; i < L[k].Count; i++)
{
    int x = L[k][i].x, y = L[k][i].y;

    z = z / L[k][i - 1].R * L[k][i].R;

    if(Z[y][x] > z)
        z = Z[y][x];

    D[y][x] = z;
}
```

В исходном коде используются следующие массивы:  $L$  – массив отрезков;  $Z$  – массив высот;  $D$  – массив преобразованных высот.

Элементами двумерных массивов  $Z$  и  $D$  являются вещественные числа значения высот. Элементами массива  $L$  являются массивы таких

параметров всех точек отрезка, как координаты точки (x, y) и расстояние точки до радара R.

Переменная k задает номер отрезка в массиве L. При работе алгоритма на CPU k вычисляется во внешнем цикле и должна последовательно принимать значения от 0 до L.Count (размер массива). При работе на GPU значение k является входным параметром вычислительного шейдера.

После завершения алгоритма для всех отрезков определить видимость любой точки растра можно из условия  $D[y][x] == Z[y][x]$ .

Реализация описанного алгоритма на GPU выполняется вычислительным шейдером [7,8]. При этом одновременно обрабатываются множество отрезков. Массивы отрезков, буфер дисплея радара и карта высот хранятся в памяти GPU. Загрузка карты высот (или ее части) в память GPU осуществляется с участием CPU по мере необходимости. При этом в память GPU загружаются все необходимые масштабы участков карты высот как текстуры [7,8]. Отображение на экран также осуществляется посредством GPU.

### 3. Результаты

Результат работы алгоритма на примере участка Балтийского моря показан на рис. 2.

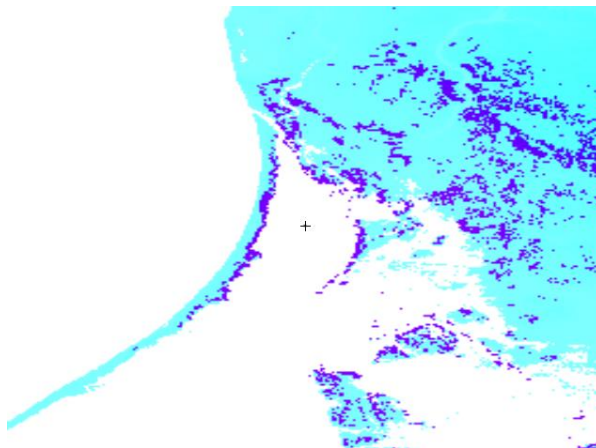


Рис. 2. Результат имитации радара

На рисунке крестик посередине обозначено судно с радаром, светлыми тонами – участки поверхности суши по карте рельефа, а темными – видимые радаром участки.

### Заключение

В статье представлена реализация имитационной модели радара в составе рыболовного тренажерного комплекса с использованием цифровых моделей рельефа поверхности. Описаны эффективные варианты реализации как на центральном, так и на графическом процессорах.

### Литература

1. Волкогон В.А., Недоступ А.А., Ражев А.О., Кострикова Н.А., Поляков Р.К., Кузин В.И. Обоснование создания тренажерного комплекса по проектированию и моделированию траловых систем. Морские интеллектуальные технологии. №4(38) Т.2. 2017. - С. 177-185.
2. SRTM TILE GRABBER. Shuttle Radar Topography Mission [Электронный ресурс]. Режим доступа - свободный: <http://dwtkns.com/srtm> (дата обращения 21.04.2018)
3. Яшкардин В.Л. IEEE 754—стандарт двоичной арифметики с плавающей точкой. SoftElectro. 2009 –7 с.
4. ГОСТ 27463-87 (СТ СЭВ 356-86) Системы обработки информации. 7-битные кодированные наборы символов (с Изменением N 1), ГОСТ от 29 октября 1987 года №27463-87
5. ОАО ГОРИЗОНТ. Разработчик и изготовитель навигационных радиолокационных станций и систем, беспилотных авиационных комплексов [Электронный ресурс]. Режим доступа - свободный: <http://www.gorizontrostov.ru> (дата обращения 21.04.2018)
6. Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики. — М.: Мир, 1989. — С. 54-63. — ISBN 5-03-000476-9.
7. Буза М.К. Параллельные вычисления на графических процессорах. Искусственный интеллект. №3. 2011. – С. 108-114.
8. Боресков А. Разработка и отладка шейдеров (+ CD-ROM) Издательство: БХВ-Петербург, 2006 г.
9. Бьёрн Страуструп. Программирование: принципы и практика использования C++, исправленное издание = Programming: Principles and Practice Using C++. — М.: Вильямс, 2011. — С. 1248. — ISBN 978-5-8459-1705-8.

### References

1. Volkogon V.A., Nedostup A.A., Razhev A.O., Kostrikova N.A., Polyakov R.K., Kuzin V.I. Obosnovanie sozdaniya trenazhernogo kompleksa po proektirovaniyu i modelirovaniyu tralovykh sistem. Morskie intellektualnye tekhnologii [Rationale for creation of a simulator complex for design and modeling of trawl systems. Marine intelligent technologies]. №4(38) Т.2. 2017. - S. 177-185.
2. SRTM TILE GRABBER. Shuttle Radar Topography Mission [Electronic resource]. Available at: <http://dwtkns.com/srtm> (Access date 21.04.2018)
3. Yashkardin V.L. IEEE 754 — standart dvoichnoy arifmetiki s plavayuschey tochkoj [IEEE 754- standart for binary arithmetic with a floating point]. SoftElectro. 2009. – 7 с.
4. GOST 27463-87 (ST SEV 356-86) Sistemy obrabotki informatsii. 7-bitnye kodirovannyye nabory simvolov (s Izmeneniem N 1) [National State Standard 27463-87 (ST SEV 356-86) Information processing systems. 7-bit encrypted symbol systems (with Amendment N 1)], GOST ot 29 oktyabrya 1987 goda №27463-87

5. OAO GORIZONT. Razrabotchik i izgotovitel navigatsionnykh radiolokatsionnykh stantsiy i sistem, bespilotnykh aviatsionnykh kompleksov [OAO Gorizont. Developer and manufacturer of navigational radars and systems, unmanned aerial vehicles. Electronic resource]. Available at: <http://www.gorizontrostov.ru> (Access date 21.04.2018)
6. Rodzhers D. Algoritmicheskie osnovy mashinnoy grafiki [Algorithmic fundamentals of computer graphics]. — M.: Mir, 1989. — S. 54-63. — ISBN 5-03-000476-9.
7. Buza M.K. Parallelnye vychisleniya na graficheskikh protsessorakh. Iskusstvennyy intellekt [Graphic processor parallel computations. Artificial intelligence]. №3. 2011. — S. 108-114.
8. Borekov A. Razrabotka i otladka sheyderov (+ CD-ROM) [Shader development and debugging (+CD-ROM)] Izdatel'stvo: BKHV-Peterburg, 2006 g.
9. Byorn Straustrup. Programmirovaniye: printsipy i praktika ispolzovaniya C++, ispravlennoe izdaniye = Bjarne Stroustrup. Programming: Principles and Practice Using C++. — M.: Vilyams, 2011. — S. 1248. — ISBN 978-5-8459-1705-8.



## Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Электронное сетевое (ISSN 2588-0233) и печатное (ISSN № 2073-7173) издание  
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3  
e-mail : mit-journal@mail.ru      www.morintex.ru

### ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов.

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)
3. Одна рецензия на публикуемую статью по соответствующей специальности с подписью, заверенной гербовой печатью. При междисциплинарном исследовании предоставляются две рецензии от экспертов различных областей наук по соответствующей тематике.
4. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
5. Лицензионный договор
6. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) могут быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу [mit-journal@mail.ru](mailto:mit-journal@mail.ru) (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

По желанию авторов, документ 1 в бумажной версии и компакт-диск с документами 2 и 3 могут быть либо присланы по почте в адрес редакции, либо доставлены непосредственно в редакцию, либо переданы одному из членов редколлегии.

**На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.**

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом может быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

**Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.**

**Стоимость публикации 9000 рублей по выставляемому по запросу счету.**

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

Главный редактор научного журнала  
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

**Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ****Гайкович А. И.****Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.**

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

**Архипов А. В., Рыбников Н. И.****Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.**

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов. Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

**Караев Р. Н., Разуваев В. Н., Фрумен А. И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.**

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

**Шауб П. А.****Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.**

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

**Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.**

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

**Гайкович А. И.****Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014**

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**