

4 Hz | 86 Hz | 170 Hz | 340 Hz | 679 Hz | 1.3 kHz | 2.6 kHz | 5.1 kHz | 10.1 kHz | 20 kHz

# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

10011010011011111001010011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010010001010101  
00110101101100111000100111001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010  
10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110  
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100  
0011010100110100100001011010010101000100100001111100110011001101101011001110000001110010100101  
11011100110010101111001010101001010011010011100010110010100110010101111001010111100101101001010  
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001  
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100  
00101001110011010011110001010010101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010

№ 4 (42) Т.5 2018



**Труды**  
**Морского государственного университета**  
**имени адмирала Г.И. НЕВЕЛЬСКОГО**



# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 (42) Т. 5 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. главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

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

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

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

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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

С.П. Столяр, 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 № 4 (42) V.5 2018 www.morintex.ru ISSN 2073-7173, ISSN 2588-0233

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

## Chief Editor:

N. V. Nikitin, Doctor of Engineering, Professor

## Editorial Board

### Co-chairmen

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

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

## Council Members

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

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

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

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

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

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

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

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

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

## Editorial Staff

### Deputy Chief Editors

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

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

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

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

### Members of Editorial Staff

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

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

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

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/>

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova





**Труды**

**Морского государственного университета  
имени адмирала Г.И. Невельского**

**Proceedings**

**of Maritime State University  
named after admiral G.I. Nevelskoy**



# 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 .....	9
<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ</b>	
<b>Огай С.А., Войлошников М.В.</b> Последовательность нахождения характеристик и элементов на начальных стадиях проектирования многофункционального ледокола.....	11
<b>Кулеш В.А., Бессонова Т.И.</b> Оценка характеристик судов с учётом ледовых категорий.....	25
<b>Войлошников М.В., Огай С.А.</b> Предмет проектирования и состав характеристик накатных грузопассажирских судов.....	31
<b>Азовцев А.И., Огай С.А., Москаленко О.В.</b> Техническое предложение по созданию мореходного вездехода на воздухоопорных гусеницах повышенной грузоподъёмности.....	39
<b>Огай С.А., Войлошников М.В.</b> Суперпозиция и взаимозаменяемость проектных характеристик многоцелевого судна ледового плавания при определении их оптимальных значений.....	45
<b>ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА</b>	
<b>Москаленко М.А., Друзь И.Б.</b> Влияние кривых соединений на предельное состояние шпангоутной ветви при действии ледовой нагрузки.....	52
<b>СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)</b>	
<b>Кича Г.П., Воробьёв Б.Н., Семенюк Л.А.</b> Комбинирование фильтрования и центрифугирования – эффективный метод полнопоточной тонкой очистки масла в двухконтурных системах смазки судовых дизелей.....	59
<b>Соболенко А.Н., Самсонов А.И.</b> Расчёт теплоёмкости заряда сжатия в цилиндре двигателя работающего на газомоторном топливе.....	66
<b>Симашов Р.Р., Чехранов С.В.</b> Математическая модель двухступенчатой осевой малорасходной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса.....	70
<b>Кича Г.П., Надежкин А.В., Семенюк Л.А.</b> Новые стохастические модели очистки топлив и масел судовыми центробежными аппаратами со сложной гидродинамической обстановкой.....	77
<b>Руднев Б.И., Поваляхина О.В.</b> Локальные оптико-геометрические характеристики и результирующие потоки излучения в камере сгорания судового дизеля.....	90
<b>Волынцев А.В., Соболенко А.Н.</b> Выбор хладагента для теплонасосных установок при утилизации теплоты на судах.....	95
<b>Тарасов В.В., Самсонов А.И.</b> Экспериментальное моделирование влияния глубины удаления механических примесей из отработанных регенерированных моторных масел на изнашивание судового дизеля.....	100
<b>Горелик Г.Б., Коньков А.Ю.</b> Оценка качества водотопливной эмульсии.....	105
<b>Тарасов В.В., Соболенко А.Н.</b> Рекомендации по глубине очистки от механических примесей регенерированных моторных масел разных эксплуатационных групп.....	110
<b>ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА</b>	
<b>Чернов Б.Б., Ву Ван Мынг, Нугманов А.М., Фирсова Л.Ю.</b> Катодная защита свайного пирса с использованием солнечной панели.....	114
<b>Чернов Б.Б., Ву Ван Мынг, Нугманов А.М., Фирсова Л.Ю.</b> Формирование солевых отложений на стальной поверхности при катодной защите инженерных сооружений в морской воде.....	120
<b>ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ</b>	
<b>Дыда А.А., Осокина Е.Б., Чинчукова Е.П.</b> Параметрическая идентификация модели судна на основе степенных рядов.....	125
<b>Завьялов В.В., Саранчин А.И., Фарафонова М.А.</b> Перспективы использования автономных лазерных систем для обеспечения безопасности судовождения.....	131
<b>Пятакович В.А., Василенко А.М., Рычкова В.Ф.</b> Перспективные методы решения научной проблемы классификации целей нейросетевой экспертной системой при мониторинге морской обстановки.....	139

<b>Акмайкин Д.А., Букин О.А., Гриняк В.М., Москаленко М.А.</b> Планирование маршрута перехода судна с учётом опасности морского волнения.....	148
<b>Пятакович В.А., Рычкова В.Ф.</b> Параметрическая оптимизация нейросетевой системы классификации морских целей по критерию надёжности.....	153
<b>Завьялов В.В., Агапов В.А., Мансуров А.Р.</b> Обоснование основных характеристик приёмоизлучающего тракта корреляционного лага.....	162
<b>Пятакович В.А.</b> Система классификации морских целей на базе нейросетевых технологий.....	169
<b>Соболевская Е.Ю., Глушков С.В., Левченко Н.Г.</b> Метод оценки эффективности арктических морских грузоперевозок с использованием нечетких нейросетевых технологий.....	176

#### УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

<b>Войлошников М.В., Огай С.А., Кривец В.В.</b> Нахождение поправок к стоимости доли при приватизации судостроительных предприятий.....	183
<b>Исаев А.А., Мегей Е.С.</b> Метод оценки конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок.....	198
<b>Москаленко М.А., Друзь И.Б., Москаленко В.М., Пурденко А.П.</b> Конвенционные ограничения на применение беспилотных судов в международных морских перевозках.....	202
<b>Москаленко М.А., Друзь И.Б., Москаленко В.М.</b> Методология прогностического подхода к формализованной оценке уровня конструктивной безопасности морских судов.....	211
<b>Курбенков В.А., Пурденко А.П.</b> Анализ проблем обеспечения безопасности на море: состояние и решения.....	216
<b>Луговец А.А., Курбенков В.А.</b> Государственное регулирование безопасности морской среды и предупреждения разливов нефти и нефтепродуктов на море с судов: состояние, проблемы, решения.....	224
<b>Москаленко М.А., Друзь И.Б., Затепякин С.М.</b> Проблемы морского образования при переходе вузов на компетентностный стандарт подготовки моряков.....	233

CONTENTS

About journal ..... 9

SHIP DESIGNING AND STRUCTURE

**Sergei A. Ogai, Michael V. Voyloshnikov** The sequence of characteristics and particulars finding at the initial stages of designing of multifunctional icebreaker..... 11

**Victor A. Kulesh, Tatiana I. Bessonova** Assessment of the characteristics of ships with account of the ice categories..... 25

**Michael V. Voyloshnikov, Sergei A. Ogai** The subject of design and the sets of sought characteristics of ro-pax ships..... 31

**Anatoliy I. Azovtsev, Sergei A. Ogai, Oleg V Moskalenko** Engineering suggestion for creation of seaworthy all-terrain vehicles of increased carrying capacity on air-supported tracks..... 39

**Sergei A. Ogai, Michael V. Voyloshnikov** The superposition and interchangeability of design characteristics of multipurpose ice-navigation ship in determining of their optimum values..... 45

SHIP THEORY AND STRUCTURAL MECHANICS

**Mikhail A. Moskalenko, Ivan B. Druz** The influence of knee joint's limit state shell frame under the action of ice loads..... 52

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

**Gennady P. Kicha, Boris N. Vorob'iov, Liudmila A. Semeniuk** The combination of filtration and centrifugation – an efficient method is full-flow fine filtration of oil in a dual circuit lubrication systems of marine diesel engines..... 59

**Anatoly N. Sobolenko, Anatoly I. Samsonov** Calculation of the heat capacity of the compression charge in the cylinder of engine operating gas mode..... 66

**Rafail R. Simashov, Sergei V. Chekhranov** Mathematical model of two-step axial-flow low-consumption turbine with fractional blading of the rotor wheel..... 70

**Gennady P. Kicha, Andrei V. Nadezkin, Liudmila A. Semeniuk** New stochastic models for cleaning fuels and oils by marine centrifugal apparatus with a complex hydrodynamic situation..... 77

**Boris I. Rudnev, Olga V. Povalikhina** The local optical-geometrical data and resulting radiation heat fluxes in marine diesel combustion chamber..... 90

**Aleksandr V. Volyntsev, Anatoly N. Sobolenko** Adoption of the refrigerant when using waste heat in the ship heat pumping units..... 95

**Valery V. Tarasov, Anatoly I. Samsonov** Experimental modeling of influence the depth of removing mechanical impurities from the used regenerated motor oils on ship diesel wear..... 100

**Gennady B. Gorelik, Aleksei Yu. Konkov** Estimation of the quality of the water-fuel emulsion..... 105

**Valery V. Tarasov, Anatoly N. Sobolenko** Recommendations for cleaning depth from mechanical impurities the regenerated motor oils of the various operating groups..... 110

SHIP CONSTRUCTION REPAIR TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING INDUSTRY

**Boris B. Chernov, Van M. Vu, Anas M. Nugmanov, Liudmila Yu. Firsova** Cathodic protection of the pile pier with the use of solar panel..... 114

**Boris B. Chernov, Van M. Vu, Anas M. Nugmanov, Liudmila Yu. Firsova** Formation of salt deposits on a steel surface at cathodic protection of engineering structures in sea water..... 120

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL SYSTEM ANALYSIS

**Aleksandr A. Dyda, Elena B. Osokina, Elena P. Chinchukova** Ship model parameter identification based on power series..... 125

**Viktor V. Zavyalov, Alexandr I. Saranchin, Mariya A. Farafonova** Prospects of using autonomous laser systems to ensure the safety of navigation..... 131

**Valeriy A. Pyatakovich, Anna M. Vasilenko, Victoria F. Rychkova** Perspective methods for solving the scientific problem of target classification performed by a neural network expert system when monitoring a maritime environment..... 139

**Denis A. Akmaykin, Oleg A. Bukin, Viktor M. Grinyak, Mikhail A. Moskalenko** Ships route planning with..... 148



the account of dangerous sea waves.....

**Valeriy A. Pyatakovich, Victoria F. Rychkova** Parametric optimization of the marine target neural network classification system by reliability criterion..... 153

**Viktor V. Zavyalov, Viktor A. Agapov, Aleksey R. Mansurov** Justification of the main characteristics of receiver-transmitter tract correlation lag..... 162

**Valeriy A. Pyatakovich** Marine target classification system based on neural network technologies..... 169

**Evgenia Yu. Sobolevskaya, Sergey V. Glushkov, Natalia G. Levchenko** Method of estimation of efficiency of arctic shipping with the use of fuzzy neural network technologies..... 176

**THE MANAGEMENT IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS**

**Mikhail V. Voyloshnikov, Sergey A. Ogai, Valeriya V. Krivets** The finding of amendments to the value of shares in the privatization of shipyards..... 183

**Alexandr A. Isaev, Ekaterina S. Megey** Method of assessing the competitiveness of cabotage cargo maritime transport..... 198

**Mikhail A Moskalenko, Ivan B. Druz, Vladislav M. Moskalenko, Alexandr P. Purdenko** Convention restrictions on the use of unmanned vessels in international maritime traffic..... 202

**Mikhail A Moskalenko, Ivan B. Druz, Vladislav M. Moskalenko** Methodology of the predictive approach formalized assessment of the structural safety level of ships..... 211

**Valeriy A. Kurbenkov, Alexandr P. Purdenko** Analysis of security problems at the sea: state and solutions 216

**Alexandr A. Lugovets, Valeriy A. Kurbenkov** State regulation of security marine environment and prevention of oil and oil spill responses on the sea from ships: state, problems, solutions..... 224

**Mikhail A Moskalenko, Ivan B. Druz, Sergey M. Zatepyakin** Problems of maritime education in the transition of universities in to competence standart of the seafarers training..... 233

## 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.

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

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

## ABOUT JOURNAL

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### Basic Magazine Trends

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



Уважаемые коллеги

Создание и техническое обслуживание современных морских судов основывается на динамичном развитии судостроительной и судоходной отраслей, и это в полной мере отражается в тех задачах, которые решают научные коллективы в Морском государственном университете имени адмирала Г.И. Невельского. Предметом исследований ученых университета выступают новые методы определения характеристик и элементов судов перспективных типов по планам развития судостроения и судоходства и востребованных рынком, решение задач обеспечения прочности судов и безопасности их эксплуатации, усовершенствование судовых силовых установок и нахождение путей улучшения их экономичности, экологичности и надежности, что осуществляется на основе изучения механических и тепловых процессов в двигателях внутреннего сгорания, разработка принципов создания новых приборов, которые применяются в судоходстве, создание нового алгоритмического и программного обеспечения, разработка новых способов управления в судоходстве и судостроении на основе внедрения экономических методов и усовершенствованных правовых процедур, улучшение процесса обучения в университете курсантов и внедрение научных результатов в процесс обучения и решение задач в других направлениях исследований. Научные результаты в указанных областях реализуются на общей основе, которой служит морское гражданское судно как комплексный объект изучения и усовершенствования и особый вид транспортного средства, с использованием которого осваиваются ресурсы океана, решаются задачи развития экономики, промышленности и международного сотрудничества. Кроме этого, осуществление научных исследований в университете способствует повышению эффективности учебного процесса. Благодарю авторские коллективы и издательство научного журнала «Морские интеллектуальные технологии» за активное участие в опубликовании наших научных трудов и желаю новых достижений.

Ректор  
(CEO)

C.A. Ogai  
(Sergei A.Ogai)

Dear colleagues

The construction and the maintenance of modern ships are based on the dynamic development of the shipbuilding and shipping industries, and this is fully reflected in the tasks that research teams solve at the Maritime state university named Admiral Nevelskoi. The subject of scientists researches in the university are new methods for determining under designing of characteristics and particulars of ships of promising classes according to plans for the development of shipbuilding and shipping and the ships demanded by the market, the decision of problems of ensuring the ships strength and safety of their operation, the improving of ships propulsion systems and finding the ways to improve the power installations efficiency, environmental friendliness and reliability based on study of the mechanical and thermal processes in internal combustion engines, the development of concepts for the production of new devices and instruments for shipping, the creating new algorithmic and software, the developing of new methods for management operation in shipping and shipbuilding based on the introduction of economic approaches and on the improved legal procedures, the improving of cadets training process at the university and the introducing of scientific results into the teaching process and the fulfillment of tasks in the other areas of research. The scientific results in these areas are implemented on the general basis, which serves as merchant ship as the complex object of study and improvement and the special type of marine transportation facility, using which the ocean resources are exploited, and the tasks of economic development, industry and international cooperation are being solved. In addition, the implementation of the scientific researches at the university contributes to the effectiveness of the educational activity. I thank the authors and the publishing house of the «Marine Intellectual Technologies» scientific magazine for their active participation in the publication of our scientific works and I wish them the new achievements.



УДК 629.12.001.24:681.32

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ**  
**ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ НАХОЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК И ЭЛЕМЕНТОВ НА НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЛЕДОКОЛА**

**Сергей Алексеевич Огай**

доктор технических наук, доцент  
ректор

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: (423) 241–49–68; e-mail: ogay@msun.ru

**Михаил Владиленович Войлошников**

доктор технических наук, профессор  
главный научный сотрудник

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: 8-914-705-6029; e-mail: michael.vladlen@gmail.com

**Аннотация**

Характеристики и элементы при проектировании многофункционального ледокола (многоцелевого судна ледового плавания) подлежат определению системно с учетом значительного размера инвестиций в постройку и учитывая ответственность при принятии решений на начальных стадиях проектирования судна. Проектными ограничениями при нахождении характеристик и элементов служат характеристики более общей системы, определяемой методологически, в которую проектируемое судно включено как подсистема. При проектировании многофункционального ледокола более общей системой может выступать совокупность административных решений, предшествующих постройке судна. В соответствии с заданными проектными ограничениями определяются проектные характеристики многофункционального ледокола. Используется разработанная математическая модель. Найденные проектные характеристики показывают размер судна. Совокупность характеристик размера многофункционального ледокола включает: проектный дедвейт, водоизмещение судна по летнюю грузовую марку, валовая и чистая регистровая вместимость и др. Проектные характеристики многофункционального ледокола взаимосвязаны, также, балансовыми соотношениями, и поэтому только единичная характеристика или пара из них на начальных этапах проектирования судна могут определяться как независимые.

**Ключевые слова:** многофункциональный ледокол, проектная оптимизация, критерий оптимальности, целевая функция, проектное ограничение, характеристики судна, элементы судна

**THE SEQUENCE OF CHARACTERISTICS AND PARTICULARS FINDING AT THE INITIAL STAGES OF DESIGNING OF MULTIFUNCTIONAL ICEBREAKER**

**Sergei A. Ogai**

Associate professor, Dr. Sci. Tech.  
Rector

Maritime state university named Admiral Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: (423) 241–49–68; e-mail: ogay@msun.ru

**Michael V. Voyloshnikov**

Professor, Dr. Sci. Tech.  
Chief research scientist

Maritime state university named Admiral Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: 8-914-705-6029; e-mail: michael.vladlen@gmail.com

**Abstract**

The characteristics and the particulars in the design of multifunctional icebreaker (multipurpose ship for ice navigation) are determined systematically, given the large size of investments in the construction of the ship and the responsibility of decisions made at the initial stages of design. The design constraints in finding the characteristics and particulars of ship serve the characteristics of the general system, defined methodologically, in which the projected ship enters as the subsystem. In the design of multifunctional icebreaker the general system is the set of administrative decisions prior to the construction of ship. In accordance with the specified design constraints are determined design characteristics of the multifunctional icebreaker, which determine ship size. The created mathematical model is used. The design characteristics found perform ship size. The set of the characteristics of the

multifunctional icebreaker size of includes: the design deadweight, the displacement at the summer load line, the gross and the net tonnage and etc. The design characteristics of multifunctional icebreaker are interconnected by balance equations and only the single characteristic or the couple of ones can be defined at the initial design stages as an independent.

**Key words:** multifunctional icebreaker, design optimization, optimality criterion, objective function, design constraint, characteristics of ship, ship particulars

### Введение

Для правительственных нужд требуется постройка морской техники и судов следующих типов [3]: танкеров для использования в замерзающих морях, в том числе для перевозки сжиженного природного газа (LNG-танкеров); ледоколов; контейнерных судов для замерзающих морей; платформ и оборудования для работы на арктическом шельфе; научно-исследовательских судов для работы в Арктике; оборудования для генерирования энергии в прибрежных районах, включая возможности использования для этого возобновляемых источников (приливов, течений, ветров); плавучих средств для переработки природного газа в Арктике.

Формируемая последовательность нахождения характеристик многофункционального ледокола и проектных элементов включает:

1. Определение понятия многофункционального ледокола как предмета методологии проектирования судна, а также как объекта в системе классификации гражданских судов.

2. Формулирование задачи нахождения оптимальных характеристик и проектных элементов многофункционального ледокола в системе иерархии объектов, связанных с проектируемым судном, в частности: определение понятия объекта, служащего для судна ледового плавания общей комплексной системой, с учетом многообразия вариантов указанной общей системы; определение принципов сопоставимости вариантов при проектной оптимизации судна.

3. Нахождение проектных ограничений и совокупности исходных данных для определения оптимальных характеристик и проектных элементов судна в соответствии с результатами первой и второй задач.

4. Определение подсистем многофункционального ледокола и его представление как комплексной системы, состоящей из подсистем. Учитывается, что проектные ограничения в форме уравнений или данных являются характеристиками общей комплексной системы, частью которой выступает при проектировании многофункциональный ледокол.

5. Определение состава (вектора) искомым проектных характеристик судна в общей совокупности числовых величин, характеризующих судно путем выделения следующих классов величин:

- множества ограничений, служащих данными при проектной оптимизации, формируемого при решении второй и третьей из указанных выше задач;
- вектора проектных элементов судна, определяемого при решении четвертой задачи.

6. Формулирование используемых при проектировании многофункционального ледокола имеющих вероятностные свойства условий баланса характеристик, показывающих соотношения этих характеристик, в частности, построение уравнения

баланса водоизмещения.

7. Нахождение функциональных и параметрических зависимостей между характеристиками и проектными элементами, в том числе, элементами по их относительной величине.

8. Анализ проходимости судна во льдах определенной интенсивности в зависимости от мощности и пропульсивных характеристик судна в соответствии с заданными качествами судна в ледовых условиях в форме проектных ограничений с учетом размера судна и достаточной прочности корпуса, зависимой от конструктивных элементов судна.

9. Разработка функциональных зависимостей экономических показателей от характеристик многофункционального ледокола, от исходных данных (проектных ограничений) и параметров; формулирование функций полезности, экономических критериев и построение целевых функций для нахождения оптимальных характеристик и проектных элементов судна.

10. Разносторонняя проверка качества найденных характеристик многофункционального ледокола и устойчивости их оптимальности. Определение факторов устойчивости характеристик и проектных элементов судна.

Проверка качества включает апробацию математических моделей в вариантных расчетах по нахождению оптимальных характеристик и проектных элементов многофункционального ледокола при заданных ограничениях, включая наряду с иными также инвестиционное ограничение субсидий в создание судна и задаваемые технические требования к мореходным качествам и прочности судна во льдах.

Перечисленные задачи в большей степени решаются на начальных этапах проектирования, а именно на этапах: технического задания и технического предложения и, в меньшей степени, при разработке элементов судна на этапе эскизного или технического проекта.

Каждая из названных задач со второй по пятую системно подчинена первой, а их решения служат основой для создания методов нахождения оптимальных проектных характеристик многофункционального ледокола.

По этой причине важно корректное решение первой задачи – формулирование понятия многофункционального ледокола, то есть указание функциональных и конструктивных признаков судна этого типа, что позволяет в дальнейшем определить критерий в форме целевой функции и проектные ограничения (совокупность исходных данных), то есть множества искомым характеристик и проектных элементов, и в целом это ведет к решению задачи нахождения оптимальных характеристик многофункционального ледокола.

Примеры общего вида по проектам новых многофункциональных ледоколов, создаваемых в Российской Федерации и за рубежом, представлен

на схемах (Рис. 1 – 10).



Рис. 1. Многофункциональный ледокол по проекту № 22600 ([www.rosmorport.ru](http://www.rosmorport.ru))



Рис. 2. Многофункциональный ледокол по проекту № 21900М ([www.rosmorport.ru](http://www.rosmorport.ru))



Рис. 3. Проект многофункционального ледокола для правительства Аргентины (<http://akerarctic.fi/>)



Рис. 4. Британский проект многофункционального ледокола «Сэр Дэвид Аттенборо» ([www.cruisemapper.com](http://www.cruisemapper.com))



Рис. 5. Проект многофункционального ледокола для Института полярных исследований Китая ([www.marinelink.com](http://www.marinelink.com))



Рис. 6. Проект многофункционального ледокола Aker ARC 130A (<https://akerarctic.fi/>)



Рис. 7. Проект многофункционального портового ледокола Aker ARC 124 (<https://sdelanounas.ru/>)



Рис. 8. Проект многофункционального ледокола «Polaris» (Финляндия) по проекту Aker ARC 130, с использованием природного газа в качестве топлива (<http://arctia.fi>)



Рис. 9. Проект многофункционального ледокола «Aiviq» (США, <https://lazerone.files.wordpress.com/>)



Рис. 10. Проект многофункционального ледокола «Aiviq», создаваемого для нужд береговой охраны Канады (<http://federalfleet.ca/>)

Обзор характеристик и имеющихся конструктивно–компоновочных решений по проектам многофункциональных ледоколов, в том числе, решений, представленных на схемах, позволяет сделать вывод о том, что сформирован общий архитектурно конструктивный облик судов рассматриваемого типа.

### 1. Принципы системного подхода при определении характеристик и проектных элементов судна

В процессе проектирования многофункциональный ледокол рассматривается как сложная вероятностная система [2, 6 и 10], состоящая из подсистем. Подсистемой служит либо целостное судно, оцениваемое с позиций его отдельного свойства, в частности, того или иного мореходного качества, а также прочности или иной эксплуатационной характеристики, либо конструктивная часть судна, устройство, механизм и др.

При совмещении подсистем многофункционального ледокола, то есть его отдельных его качеств, выступающих в методологическом определении частями проектируемого объекта, возникают новые качества объекта, отсутствующие в этих частях, то есть в подсистемах многофункционального ледокола, исследуемых при проектировании отдельно.

Новые качества многофункционального ледокола, возникающие при совмещении подсистем судна, при нахождении проектных характеристик являются наиболее важными для анализа.

Исследование многофункционального ледокола как совокупности его подсистем и дополнительного качества, возникающего при совмещении этих подсистем, служит предпосылкой для вывода, что судно, само по себе, выступает подсистемой комплексного объекта, характеристики которого служат исходными данными, то есть проектными ограничениями при нахождении характеристик многофункционального ледокола в рамках системного подхода.

Возникает системная иерархия задач при проектировании многофункционального ледокола. К иерархическим уровням относятся:

– задача внешнего проектирования – определение характеристик судна из числа: проектный дедвейт, водоизмещение судна по грузовую марку, водоизмещение порожнем, валовая и чистая регистровая вместимость, грузоподъемность, объем грузовых или служебных помещений, показатели эффективной и установочной мощности, эксплуатационная скорость и характеристики эксплуатационных качеств во льдах, в частности толщина сплошного форсируемого льда (которая в то же время служит проектным ограничением) и др.;

– задача внутреннего проектирования – определение элементов судна: размерений, их соотношений, характеристик отдельных конструктивных частей и пр.

Можно назвать следующие примеры общих объектов, служащих комплексными системами, которые могут включать проектируемое судно как свою подсистему [10]:

1) флот грузоперевозчиков при определении его состава и пополнения в рамках «внешней задачи» проектирования транспортного судна, если спрос формируется административным решением;

2) комплекс (полная совокупность) активов морского предприятия (судоходной компании), в который входит проектируемое судно;

3) морской грузопоток определенной интенсивности и протяженности, обслуживаемый совокупностью сходных транспортных судов;

4) комплекс сходных судов, осуществляющих освоение морских ресурсов в определенном районе и др.

К числу примеров общей системы, включающей многоцелевое судно ледового плавания на начальных этапах его проектирования, также относятся:

5) новые технологические возможности в судостроении, необходимые для постройки многофункционального ледокола;

6) заданные функции многофункционального ледокола, неявно влияющие на его характеристики,

такие как способность форсирования ледового поля;

7) главное оборудование, создаваемое до проектирования судна и пр., например, реакторы (технологические или энергетические – химические, ядерные и пр.), установки для осуществления технологических процессов на борту, такие как сжижение природного газа или производство электрической энергии, кроме энергии для судовых нужд, специальные системы и оборудование для форсирования льда, для обслуживания спускаемых или летательных аппаратов и пр.

То есть понятие общей комплексной системы может означать оборудование, создаваемое до проектирования многофункционального ледокола. Тем самым судно разрабатывается для установки главного оборудования.

Методологически можно считать новым качеством целостного судна инновационного назначения, то есть его новой функциональной системой созданные инновационные возможности в судостроении, если таковые новые технологические возможности, которые не потребовались бы для серийной постройки судов, необходимы для постройки судов, функции которых определяются федеральными программами или Стратегией развития судостроения.

Критерии оптимальности при проектировании судна обычно имеют экономический характер и определяются математическими действиями над основными экономическими показателями: совокупного дохода  $I$ , операционных расходов  $C$ , инвестиций–рыночной стоимости  $MV$  или иной стоимости, например, сумме затрат на создание нового судна в рыночных ценах, то есть восстановительной стоимости  $RC$

Использование принципов системного подхода дает возможность в составе математической модели классифицировать аргументы целевой функции  $f$ , характеризующие проектируемое судно, в множества: искомым переменных характеристик судна  $X$ , исходных данных  $Z$ , то есть характеристик общей комплексной системы, подсистемой которой выступает многофункциональный ледокол, и параметров  $Y$  (элементов судна, то есть характеристик его подсистем).

Целевая функция строится как математическая модель для определения оптимальных проектных характеристик многофункционального ледокола и является последовательностью зависимостей между переменными  $X$ , параметрами  $Y$  и данными  $Z$ , с одной стороны, и основными экономическими показателями судна: доходом  $I$ , себестоимостью  $C$  и инвестициями  $MV$  или  $RC$  – с другой стороны.

Множество переменных  $X$  (искомым характеристик судна) определяется в составе независимых величин, которые существенно влияют на критерий оптимальности (в форме целевой функции  $f$ ). Пример переменных  $X$ : водоизмещение судна по грузовую марку  $D$ , проектный дедвейт  $DW$ , грузоподъемность  $PG$ , валовая регистровая вместимость  $GRT$ , чистая регистровая вместимость  $NRT$ , эффективная мощность  $Ne$ , пропульсивная мощность при форсировании льда  $N_{ice}$ , эксплуатационная скорость в открытой воде  $v_s$  и др.

Множество параметров  $Y$  (проектных элементов), характеризующих подсистемы судна, определяется в составе тех независимых величин,



которые по отдельности не оказывают существенного влияния на критерий оптимальности  $f$  (соразмерного влиянию переменных на критерий). Пример параметров  $Y$ : расчетная длина  $L$ , ширина  $B$ , высота борта  $H$ , осадка  $T$ , коэффициент общей полноты  $\delta_w$ , элементы судна по относительной величине  $L/B$ ,  $B/T$ ,  $H/T$ ,  $L/H$  и др.

Данными  $Z$  (проектными ограничениями), служат характеристики общей комплексной системы, в которую проектируемое судно включено. Пример данных  $Z$ : заданное ограничение по размеру субсидий  $RC^*$ , заданная функция судна, в частности ледовая категория или толщина форсируемого ледового поля  $h$ , расстояния и протяженности, сезонности, тарифы, др.

При нахождении проектных характеристик многофункционального ледокола параметры  $Y$  и данные  $Z$  выступают константами как заданные проектные ограничения, их можно на начальных этапах проектирования судна принимать конструктивно, в частности по проектному аналогу, и считать неизменными в процессе нахождения проектных характеристик судна  $X$ .

## 2. Оценка ходкости и прочности с учетом категории судна во льдах

Зависимость толщины сплошного форсируемого льда от водоизмещения судна, от эффективной мощности пропульсивного комплекса и от характеристик формы корпуса уточняется с использованием данных аналогов-новых судов ледового плавания и их проектов.

Алгоритм, используемый для определения пропульсивной и установочной мощности в зависимости от ограничения по толщине форсируемого льда, учитывает, также, ограничения по наименьшей скорости в открытой воде и резерв установочной мощности для целей генерирования энергии, передаваемой на другие суда или потребителям на берегу.

Прочность в условиях воздействия льда в районе ледового пояса оценивается с учетом изгиба бортового перекрытия и обшивки и с учетом того, что при воздействии льда более критична прочность пластины бортовой обшивки, один из размеров которой равен шпациии.

Также учтено, что на уровне воздействия льда на корпус на судах ледового плавания высоких категорий или ледокольных классов могут устанавливаться дополнительные промежуточные шпангоуты.

В составе математической модели при определении проектных характеристик многофункционального ледокола толщина обшивки определяется с учетом установки дополнительного набора корпуса, что используется для нахождения водоизмещения судна с учетом проектного ограничения по толщине форсируемого льда.

Принимая во внимание возможные несоответствия эксплуатационных качеств судна во льдах и предписываемых классификационными обществами ледовых категорий, рассматривается возможность применения комплексного критерия эксплуатационных качеств судна во льдах, учитывающего как безопасную скорость судна, так и толщину сплошного форсируемого льда, а также

толщину битого льда определенной сплоченности, преодолеваемого при избегании «ледового плена», и толщину сплошного льда, давление которого судно выдерживает со стороны бортов.

Могут быть несколько различных критериев ледовых нагрузок для тех или иных используемых методических предпосылок. Однако соответствие наиболее сложному из критериев нагрузок означает в то же время соответствие остальным критериям, которые могли бы рассматриваться как дополнительные.

Приоритетным критерием качеств судна во льдах использования в составе математических моделей на начальных этапах проектирования многофункционального ледокола, а также иных судов высоких ледовых и арктических категорий и ледокольных классов может служить наибольшая толщина сплошного форсируемого льда. Указанный показатель эксплуатационных качеств во льдах также находится в центре внимания классификационных обществ и взаимосвязан с другими рассматриваемыми показателями качеств судна во льдах.

Проектные ограничения в связи с заданной ледовой категорией судна, то есть предписанные для проектирования судна характеристики ледовых условий оказывают влияние на проект судна по следующим общим направлениям. Во-первых, выбор элементов судна ледового плавания, таких как размерения корпуса и их соотношения, а также элементы формы корпуса и элементы пропульсивного комплекса и др. подчинены функции форсирования льда, но результирующие проектные решения в меньшей степени соответствуют задачам эффективной эксплуатации судна в открытой воде. Во-вторых, соответствие проектных элементов судна задаче форсирования льда не означает само по себе увеличение собственной массы судна порожнем по сравнению с массой судна, не имеющего ледовой категории, но сопоставимого по характеристикам размера, например, по дедеуиту или по вместимости. Суда в этом примере могут быть соразмерны по собственной массе, если в составе проектных ограничений первого из судов была бы задана небольшая ледовая категория, хотя эти суда будут иметь принципиальные отличия по проектным элементам, таким как соотношения размерений, форма корпуса и элементы пропульсивного комплекса, а также по характеристикам ходкости и пропульсивных качеств в открытой воде. В то же время в рамках этого класса суда ледового плавания, имеющие сходные размерения и характеристики формы корпуса, а также сходные элементы движительно-рулевого комплекса могут иметь существенно различающуюся собственную массу в зависимости от отличий их ледовой категории, заданной при проектировании.

То есть, по конструктивным и функциональным признакам судно ледового плавания в широком диапазоне предписываемых в проект возможных ограничений по мореходным качествам во льдах выступает как объект, принципиально отличающийся от судна, не предназначенного для использования во льдах, хотя, если речь идет о незначительной ледовой категории, судно ледового плавания может не иметь существенных отличий по собственной массе от судна, не имеющего ледовой категории.

Отличия по собственной массе или по отношениям полезной нагрузки к водоизмещению могут служить характеризующими признаками в рамках классов судов ледового плавания для соразмерных судов, отличающихся ледовыми категориями.

Нужно заметить, что по правилам Регистра регламентируются условия движения ледокола непрерывным ходом в сплошном ледовом поле заданной толщины, хотя условия преодоления ледового поля непрерывным ходом не характеризуют в полной мере ледокольные качества судна, имеющего определенный размер и соответствующую пропульсивную мощность. За счет применения систем, движителей и режимов движения ледокольные качества практически выше, чем способность преодолевать сплошное ледовое поле непрерывным ходом, что не вполне характерно в предельных для категории соответствующей ледовых условиях.

На графической функциональной поверхности (Рис. 11, а) показана рекомендуемая зависимость эффективной мощности  $N_e$  силовой установки многофункционального ледокола от наибольшей толщины форсируемого сплошного ледового поля  $h$  и от размера судна, который можно охарактеризовать проектным дедвейтом  $DW$ , от которого зависит водоизмещение по грузовой марке  $D$  (при использовании уравнения баланса массы судна).

Задача определения эксплуатационной скорости многофункционального ледокола на открытой воде является зависимой от найденных элементов формы корпуса и от пропульсивных качеств, соответствующих функции форсирования льда, при условии, что значения эффективной мощности для движения судна на открытой воде  $N_e$  и пропульсивной мощности  $N_{ICE}$  в режиме форсирования льда заданной интенсивности соразмерны ( $N_e \approx N_{ICE}$ ).

Зависимость эксплуатационной скорости на открытой воде  $v_s$  от размера судна  $DW$  и от наибольшей толщины форсируемого сплошного ледового поля  $h$  показана на графике (Рис. 11, б).

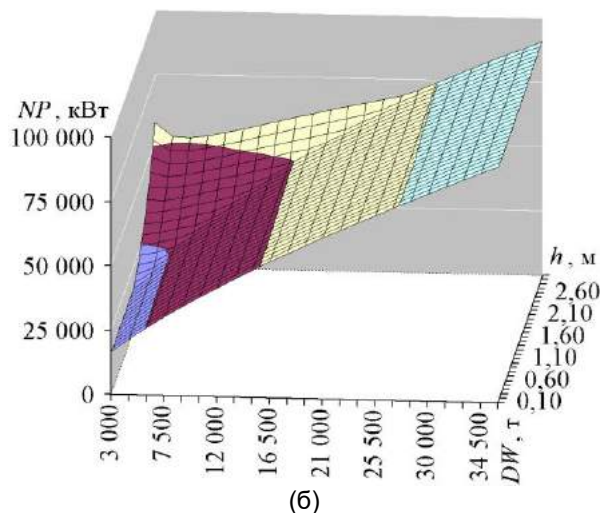
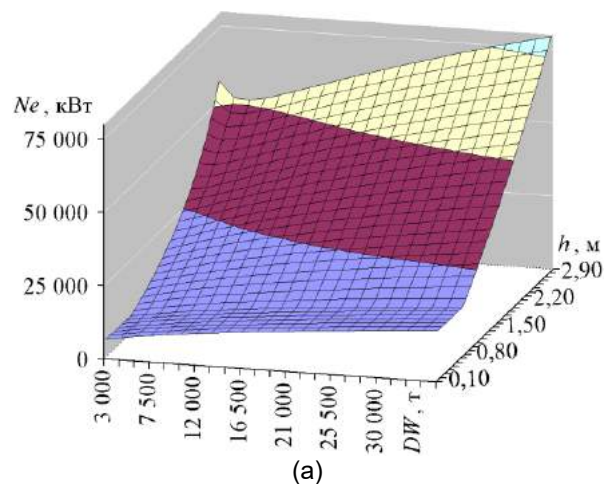


Рис. 11. Зависимости от проектного дедвейта  $DW$  многофункционального ледокола и от наибольшей толщины форсируемого сплошного ледового поля  $h$ : (а) эффективной мощности  $N_e$  для движения судна в открытой воде и (б) суммарной мощности судовых источников энергии (силовой установки)  $NP$

При малых заданных в качестве проектного ограничения значениях толщины ледового поля  $h$  эксплуатационная скорость судна на открытой воде  $v_s$  для достаточной управляемости судна соответствует ее нижнему ограничению. Кроме этого из методических соображений в оценку скорости на открытой воде  $v_s$  вводится верхнее ограничение, имеющее для основных диапазонов значений размера судна и его ледовой категории в известной мере условный характер.

При иных значениях проектного ограничения по толщине ледового поля  $h$  эксплуатационная скорость  $v_s$  определяется в зависимости от эффективной мощности  $N_e$ , соответствующей потребной (пропульсивной) мощности  $N_{ICE}$  в режиме форсирования льда заданной интенсивности.

Стоит обратить внимание, что накладываемая совокупность ограничений при нахождении скорости многофункционального ледокола на открытой воде  $v_s$  предопределяет особенности формы полученной функциональной поверхности, возникающие на границе действия этих предпосылок. В зависимости от нижнего проектного ограничения эксплуатационной скорости на открытой воде требуемая пропульсивная мощность  $N_{ICE}$ , которая необходима для форсирования сплошного ледового поля относительно небольшой толщины, найденная с учетом принятого нижнего ограничения скорости судна на открытой воде, меньше эффективной мощности для движения на открытой воде  $N_e$ . В остальном диапазоне проектного ограничения по толщине сплошного льда  $h$  значения эффективной мощности для движения судна на открытой воде  $N_e$  и потребной мощности для форсирования льда  $N_{ICE}$  соразмерны, так как потребная мощность для форсирования льда  $N_{ICE}$  выступает предпосылкой для определения эффективной мощности  $N_e$  и скорости судна  $v_s$  на открытой воде. Поэтому возникает особенность функциональной поверхности, другими словами, характерная линия разграничения предпосылок при определении потребной мощности или эксплуатационной скорости

на открытой воде  $v_s$ . Линия разграничения предпосылок на полученных для судна ледового плавания функциональных поверхностях является характерной особенностью и соответствует двухрежимности эксплуатации: как во льдах, так и на открытой воде.

Суммарная мощность судовых источников энергии  $NP$  при проектировании судна определяется не ниже эффективной мощности  $N_e$ . Суммарная мощность  $NP$  в широком диапазоне характеристик (Рис. 11, б) зависит от размера многофункционального ледокола ( $DW$  или  $D$ ), а при меньших размерах судна суммарная мощность судовых источников энергии зависит и от заданного проектного ограничения по толщине форсируемого сплошного льда  $h$ . Поскольку для движения во льдах требуется больше мощности (в зависимости от проектного ограничения по толщине сплошного льда  $h$  с учетом заданной в проект ледовой категории судна), то избыток мощности судовых источников энергии ( $NP - N_{св}$ ) более характерен для судов меньших ледовых категорий.

В последовательностях зависимостей, применяемых в составе математической модели для начальных этапов проектирования, производится анализ прочности корпуса при сжатии в ледовом поле, которое действует в средней части и на большой протяженности корпуса. Предполагается, что ледовая нагрузка в остальных частях корпуса по величине зависит от нагрузки в средней части, и учитывается, что наибольшее совокупное влияние на массу корпуса судна ледового плавания оказывают конструкции в средней части судна и обшивка, которая находится под нагрузкой при сжатии судна льдами.

В подходах к конструктивной прочности бортовых перекрытий судна ледового плавания есть возможные альтернативы, связанные, во-первых, с возможностью увеличения толщины обшивки для повышения прочности бортового перекрытия, при этом ниже затраты на постройку и увеличивается коррозионная долговечность корпуса, и, во-вторых, с возможностью повышения прочности перекрытия с усилением набора балок главного направления, или с увеличением их количества за счет уменьшения шпации, или за счет установки дополнительного набора в нагруженных местах.

Учитывая известную условность разных правил классификации категории и мореходности судна во льдах, тем не менее, на разных этапах проектирования требуется оценка этих качеств: способности форсировать сплошное ледовое поле определенной толщины, достаточной пропульсивной мощности для движения судна в сплоченном битом льду и для удовлетворительной управляемости в этих условиях, достаточной прочности обшивки и перекрытий корпуса как в оконечностях судна для условий форсирования сплошного льда, так и на уровне ледового пояса при обжатии судна с бортов, и других критериев.

На начальных этапах проектирования возможно установление иерархии показателей эксплуатационных качеств судна во льдах из числа названных или иных, и в соответствии с этой иерархией можно придерживаться наиболее важного показателя в качестве проектного ограничения и

критерия ледовых качеств при нахождении характеристик многофункционального ледокола.

### 3. Проектные характеристики и элементы многофункционального ледокола

В качестве переменной оптимизации характеристика проектного дедвейта  $DW$  многофункционального ледокола определяется как наибольший размер переменных слагаемых, включая массу следующих элементов нагрузки: груза, топлива, балласта, экипажа, судовых запасов и других переменных слагаемых водоизмещения  $D$ , а также задаваемые при проектировании постоянные составляющие полезной нагрузки в составе водоизмещения  $D$ , то есть такие элементы, как масса главного оборудования, например, модульного, создаваемого до проектирования судна в соответствии с функцией его назначения, и иные постоянные составляющие водоизмещения, которые при проектировании не зависят от водоизмещения судна.

Водоизмещение судна по грузовой марке  $D$  и водоизмещение многофункционального ледокола порожнем  $DP$  находятся в зависимости от проектного дедвейта  $DW$ , а также от заданного проектного ограничения по толщине  $h$  форсируемого льда, рассматриваемого на начальных этапах проектирования судна в связи с остальными показателями эксплуатационных качеств судна во льдах. Зависимость водоизмещения ( $D$ ) от проектного ограничения по эксплуатационным качествам судна во льдах ( $h$ ) имеет неявный характер, в отличие от зависимости водоизмещения от проектного дедвейта ( $DW$ ).

Сократить размерность проектной задачи можно за счет использования уравнений баланса, устанавливающих соотношения между зависимыми характеристиками многофункционального ледокола и его независимыми характеристиками, варьируемыми с учетом проектных ограничений в процессе оптимизации на предмет определения их оптимальных значений, а также за счет использования параметрических зависимостей между характеристиками судна и его проектными элементами и зависимостей между элементами как таковыми и их соотношениями.

На начальных стадиях проектирования многофункционального ледокола помимо связанного с провозоспособностью судна его размера, характеризующего возможности по осуществлению судном служебно-вспомогательных ледокольных и навигационных функций во льдах, в качестве второй независимой характеристики можно назвать показатель мореходности во льдах, например заданную толщину  $h$  сплошного форсируемого льда, которая, выступая проектным ограничением (то есть данным), в то же время означает проектную характеристику судна, поскольку неразрывно связана с назначенной ледовой или арктической категорией или с назначенным ледокольным классом, а также будучи, прежде всего, характеристикой ледокольных качеств судна во многом предопределяет иные его качества во льдах соответствующей плотности и сплоченности, такие как достаточную прочность корпуса и мощность силовой установки, необходимую для движения во льдах.

Так же, как выбранную характеристику размера многофункционального ледокола, например, проектный дедвейт  $DW$ , можно было бы считать отображением некоторого количества независимых проектных характеристик и зависимых от них остальных характеристик с определенными окрестностями их возможного независимого варьирования, так и показателем мореходных качеств судна во льдах можно было бы считать заданную толщину сплошного форсируемого льда  $h$ , служащую образом некоторого количества взаимосвязанных показателей, среди которых один выступает независимым, например назначенная толщина сплошного льда, а остальные характеристики качеств во льдах находятся в зависимости от него с некоторыми возможными отступлениями от их предопределенных значений, что могло бы служить предметом для анализа на дальнейших стадиях проектирования многофункционального ледокола.

Выбор в качестве независимой переменной проектного дедвейта  $DW$ , от которого зависят остальные характеристики размера многофункционального ледокола: водоизмещение  $D$ , грузоподъемность  $PG$ , валовая  $GRT$  и чистая  $NRT$  регистровые вместимости, эффективная мощность  $Ne$ , пропульсивная мощность во льдах  $N_{ice}$ , эксплуатационная скорость в открытой воде  $v_s$  и др., иные из которых при определенных основаниях можно было бы использовать в качестве независимых переменных взамен проектного дедвейта  $DW$ , и элементы судна, рассчитываемые на дальнейших этапах проектирования: расчетная длина  $L$ , ширина  $B$ , высота борта  $H$ , осадка по грузовую ватерлинию  $T$ , коэффициент общей полноты  $\delta_w$ , соотношения элементов судна:  $L/B$ ,  $B/T$ ,  $H/T$ ,  $L/H$  и др. можно связать с удобствами при разработке методологических подходов для решения задачи нахождения оптимальных характеристик и элементов многофункционального ледокола по следующим причинам:

1. Характеристика проектного дедвейта  $DW$  многофункционального ледокола охватывает, в том числе, размер задаваемых при проектировании постоянных составляющих полезной нагрузки, то есть массу главного оборудования, например, модульного, создаваемого до проектирования судна в соответствии с функцией назначения судна и этого оборудования.

2. Проектный дедвейт  $DW$  многофункционального ледокола при нахождении его оптимального значения может выступать не только как искомая проектная характеристика, а также в качестве функции полезности и знаменателя в экономическом критерии, используемом как целевая функция при проектной оптимизации.

3. В соответствии со сложившейся международной практикой дедвейт судна (его наибольшее значение, то есть проектный дедвейт) как в контрактах и документах классификационных и регистрирующих органов, так и в базах данных в информационных сетях входит в число наиболее употребимых характеристик судов, наряду с иными показателями: валовой и чистой вместимости ( $GRT$  и  $NRT$ ), габаритной длины  $LOA$ , эффективной мощности  $Ne$ , эксплуатационной скорости  $v_s$  и некоторыми другими.

При этом найденные приближенно с использованием параметрических зависимостей на начальных стадиях проектирования многофункционального ледокола его элементы ( $L$ ,  $B$ ,  $H$ ,  $T$ ,  $\delta_w$ ,  $L/B$ ,  $B/T$ ,  $H/T$ ,  $L/H$  и др.) служат для сокращения диапазонов возможных значений проектных элементов и зависимых характеристик судна, которые будут найдены на последующих стадиях проектирования, когда оптимальные значения независимых характеристик будут выступать как данные (проектные ограничения).

#### 4. Критерий оптимальности проектируемого многофункционального ледокола

Среди основных экономических критериев, которые могут применяться для определения оптимальных проектных характеристик судов основных классов, таких как транспортные суда, представлены две общие группы: критерии, связанные с минимизируемыми затратами, и критерии максимизируемой прибыли или рентабельности. С учетом того, что многофункциональный ледокол создается обычно на бюджетные субсидии или с привлечением бюджетных и корпоративных инвестиций совместно, то для определения оптимальных проектных характеристик судна следует придерживаться критерия минимизируемых затрат, учитывая, также поправку по оценке возможного внебюджетного дохода к затратам.

Поскольку основные экономические показатели многофункционального ледокола, на соотношении которых определяется критерий, то есть такие показатели, как единовременные инвестиции в создание судна, ежегодные эксплуатационные затраты и возможный корпоративный доход (внебюджетный), учитываемый как поправка, являются функциями от независимых переменных – искомых характеристик  $X$  судна и от проектных ограничений, иными словами, от исходных данных  $Z$  и параметров  $Y$ , то результирующий критерий в форме затрат с указанной поправкой также выступает функцией от этих математических величин:  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , то есть целевой функцией  $f$ , для нахождения которой в указанных зависимостях строится математическая модель, предназначенная для определения оптимальных проектных характеристик многофункционального ледокола методами оптимизации.

Экономический критерий, используемый при оптимизации в форме целевой функции  $f$ , основывается на соотношении основных экономических показателей: дохода  $I$ , себестоимости  $C$  и инвестиций  $RC$ .

В отличие от совокупного дохода  $I$  и операционных расходов  $C$ , которые характеризуют распределенные во времени экономические потоки, а в математических моделях и алгоритмах обычно определяются в расчете на год, инвестиции  $MV$  или  $RC$  имеют одноразовый или дискретный во времени характер или могут быть преобразованы к оценке единого показателя текущей стоимости. Критерий оптимальности, в форме целевой функции  $f$ , служащий способом использования критерия экономической эффективности при определении проектных характеристик судна и являющийся



математическим обобщением над доходом  $I$ , себестоимостью  $C$  и инвестициями  $RC$ , находится, как показано на схеме математической модели (Рис. 12), в зависимости от переменных  $X$ , параметров  $Y$  и данных  $Z$ , поскольку в зависимости от них определяются указанные основные экономические показатели судна:  $I$ ,  $C$  и  $RC$ .

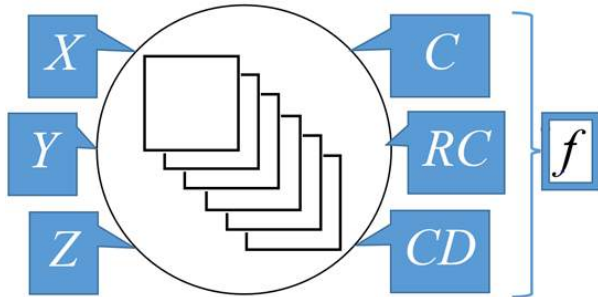


Рис. 12. Схема математической модели

Целевая функция  $f(X, Y, Z)$  выступает последовательностью зависимостей между влияющими на ее значение показателями: переменными  $X$ , параметрами  $Y$  и данными  $Z$ , с одной стороны, и основными экономическими показателями ( $C$ ,  $CD$  и  $RC$ ), с другой стороны, обобщением, которых, служит экономический критерий:

$$f(C, CD, RC) = f(X, Y, Z), \quad (1)$$

Для сравнительной оценки вариантов многофункционального ледокола на начальных этапах проектирования при варьировании значений характеристик с системной точки зрения нужно критерий приведенных затрат  $PW$  определять по удельной величине – в расчете на единицу полезного эффекта (функции полезности судна, то есть функциональной эффективности) [4].

Вариантами функции полезности многофункционального ледокола могут быть:

- характеристика транспортной функции судна  $Q_G$  (годовой провозоспособности) в единицах массы или кубатуры груза или в укрупненных унифицированных единицах;

- характеристика размера судна из числа: проектный дедвейт  $DW$ , водоизмещение судна при осадке по грузовую марку  $D$ , грузоподъемность  $PG$ , регистровая вместимость (валовая  $GRT$  или чистая  $NRT$ ) и др., которая показывает его пригодность для выполнения служебно-вспомогательных функций, навигационного обслуживания иных судов, не имеющих ледовой категории, пригодность многофункционального ледокола для несения на борту специального оборудования, предназначенного для тех или иных функций в замерзающих морях.

Во втором варианте помимо указанных характеристик размера судна могла бы также связанная с размером та или иная характеристика судовых источников энергии или механизмов: эффективная мощность  $Ne$ , потребная мощность во льдах (пропульсивная)  $N_{се}$ , суммарная мощность судовой силовой установки  $NP$  и т.д.

Целевая функция в форме удельных приведенных затрат в расчете на единицу эффекта

( $PW / E$ ) с учетом экономии бюджетных затрат  $CD$  для использования при определении оптимальных характеристик и проектных элементов многофункционального ледокола имеет вид

$$f = PW / E = (C - CD + i \times RC) / E. \quad (2)$$

При определении оптимальных проектных характеристик многофункционального ледокола могут быть применены следующие виды ограничений, которые можно отнести к технологическим, конструктивным, функциональным и экономическим группам показателей:

- заданная явно постоянная часть проектного дедвейта, включающая массу оборудования специального назначения, а также иное заданное ограничение размера судна (по показателю проектной вместимости, по расчетной длине и др.);

- неявно заданная постоянная часть проектного дедвейта, как характеристика функционального назначения многофункционального ледокола или его главной системы, назначение которой соответствует функциям судна;

- элементы многофункционального ледокола, то есть характеристики его подсистем, уточняемые на последующих этапах проектирования;

- финансовое ограничение по размеру субсидируемой части инвестиций в создание судна и др.

В качестве вариантов функции полезности, то есть зависимости показателя полезного эффекта от переменных и проектных ограничений – исходных данных и параметров рассматриваются: характеристика транспортной функции судна, то есть его провозоспособности, в том числе автономной провозоспособности в ледовых условиях, и характеристика размера многофункционального ледокола, которая показывает его способность служить для базирования оборудования и персонала и для оказания вспомогательных навигационных услуг в ледовых условиях, в том числе прокладывать фарватеры в ледовых полях.

Критерии указанных видов, представлены близкими формулами

$$PW / DW = (C - CD + i \times RC) / DW$$

$$\text{и } PW / Q_G = (C - CD + i \times RC) / Q_G, \quad (3)$$

В широком интервале варьирования размера многофункционального ледокола его годовую провозоспособность  $Q_G$  для каждого заданного проектного ограничения по толщине сплошного форсируемого льда  $h$  можно на начальных этапах проектирования считать пропорциональной размеру судна, и замена одной функции полезности на другую из двух рассмотренных вариантов ( $Q_G$  и  $DW$ ) в знаменателе экономического критерия практически не может повлиять на положение оптимального экстремума целевой функции вдоль оси искомой характеристики размера многофункционального ледокола.

Для учета инвестиционного ограничения по соответствию искомого размера судна  $DW$  его субсидируемому размеру  $DW^*$  используется обобщенный критерий, охватывающий в сумме

экономический показатель удельных приведенных затрат ( $PW / DW$ ) и штрафную (или премиальную) поправку  $\Delta_{PW/DW}$  за соответствие размера судна  $DW$  его субсидируемому значению  $DW^*$  с учетом экспертного фактора  $a_F$  этой поправки.

В том случае, когда возникает экономия субсидий, ее можно оценить по текущей стоимости потока приведенных затрат  $\Delta_{PW}$ , равноценной этой экономии, что было бы дополнительным результатом для инвестора.

Поправка (штрафная или премиальная) к целевой функции на соответствие варьируемого размера судна  $DW$  его субсидируемому размеру  $DW^*$ , оцениваемая на единицу функции полезности, в частности на единицу размера multifunctional icebreaker  $DW$ , равна

$$\Delta_{PW/DW} = PW / DW \times a_F \times (RC / RC^* - 1), \quad (4)$$

а целевую функцию (Рис. 13) в форме удельных приведенных затрат ( $PW / DW$ ) с учетом этой штрафной (или премиальной) поправки можно представить, как

$$f = PW / DW + \Delta_{PW/DW} = PW / DW \times (1 + a_F \times (RC / RC^* - 1)) \quad (5)$$

или  $f = PW / DW + PW \times a_F \times (1 / DW^* - 1 / DW)$ .

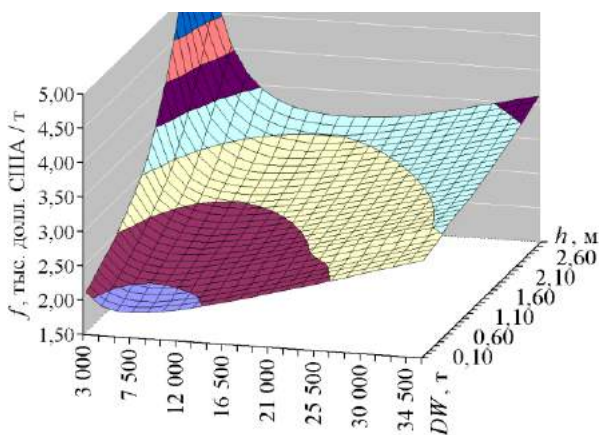


Рис. 13. Зависимость целевой функции  $f$  от проектного ограничения по наибольшей толщине  $h$  форсируемого льда и от искомой переменной характеристики проектного дедвейта  $DW$  с учетом финансового ограничения субсидий  $RC^* = 500$  млн долл. США в создание судна и соответствующего ограничения субсидируемого размера судна  $DW^* = 16\ 270$  т

Балансовыми соотношениями (уравнением баланса водоизмещения) найденные значения проектного дедвейта  $DW$  связаны с остальными характеристиками размера судна.

Кроме этого можно в качестве первоначального приближения найти проектные элементы, используя имеющиеся параметрические зависимости.

### 5. Значения проектных элементов многофункционального ледокола

В зависимости от характеристики водоизмещения  $D$  по грузовую марку многофункционального ледокола, которая может варьироваться при проектной оптимизации или определяться в зависимости от иной варьируемой характеристики размера ( $DW$ ), проектные элементы  $Y$  на начальном этапе проектирования можно приближенно найти по системе параметрических равенств

$$\begin{cases} L / B = 0,0043 \times L + 3,72, \\ B / T = 0,0161 \times L + 1,083, \\ \delta_w = 0,0007 \times L + 0,541, \\ D = 1,025 \times \delta_w \times L \times B \times T. \end{cases} \quad (6)$$

По анализу зависимостей проектных элементов многофункционального ледокола от характеристики водоизмещения  $D$  по грузовую марку, в довольно широком интервале варьирования размера судна в интервале от 7 600 до 91 200 т можно найти, что проектные элементы  $Y$  составляют в интервалах:

- отношение расчетной длины судна к ширине  $L / B$  от 4,06 до 4,76;
- отношение ширины судна к осадке по грузовую марку  $B / T$  от 2,34 до 4,97;
- отношение высоты борта до уровня главной палубы к осадке по грузовую марку  $H / T$  от 1,32 до 1,50;
- коэффициент общей полноты  $\delta_w$  от 0,596 до 0,710.

При уточнении значений, ранее найденных по параметрическим зависимостям, проектные элементы судна подлежат определению на последующих шагах с применением методов оптимизации или на основе собственных методов нахождения проектных элементов судна. Это отражает этапный характер проектирования в рамках системного подхода, при котором найденные приближенно на начальных стадиях проектирования элементы многофункционального ледокола ( $L, B, H, T, \delta_w, L/B, B/T, H/T, L/H$  и др.) и его остальные характеристики ( $D, PG, GRT, NRT, Ne, N_{ICE}, v_s$  и др.), служат для сокращения интервалов их возможных значений, уточняемых на последующих стадиях проектирования, когда найденные на начальном этапе оптимальные значения независимых характеристик будут выступать как данные (проектные ограничения).

Проектные элементы многофункционального ледокола по их относительной оценке ( $L/B, B/T, H/T, L/H, \delta_w$  и др.) устойчивы при варьировании проектного ограничения по наибольшей толщине сплошного форсируемого льда  $h$  и переменной характеристики размера судна: водоизмещения по грузовую марку  $D$ , проектного дедвейта  $DW$  или иной.

### Выводы

7.1. В задаче нахождения проектных характеристик многофункционального ледокола возникает система уровней, которая помимо судна включает общий комплексный объект, подсистемой которого выступает проектируемое судно, а также подсистемы судна, для которых оно служит общим комплексным объектом.

7.2. Системный методологический подход дает возможность классифицировать входящие в математические модели числовые величины, относя их к множествам: независимых переменных, исходных данных и параметров. Это позволяет с использованием проектных ограничений решить вопрос сопоставимости вариантов при определении оптимальных характеристик судна.

7.3. Искомый размер многофункционального ледокола при проектировании можно охарактеризовать проектным дедвейтом  $DW$ , водоизмещением судна при осадке по грузовую марку  $D$ , грузоподъемностью  $PG$ , регистрационной вместимостью (валовой  $GRT$  или чистой  $NRT$ ) или иным соответствующим показателем.

7.4. Помимо физических закономерностей, используются также вероятностные свойства проектируемого многофункционального ледокола, которые помогают установить связи между его искомыми характеристиками, сократить размерность задачи и исключить на начальных этапах проектирования зависимые переменные из совокупности характеристик, варьируемых для поиска их оптимальных значений.

7.5. При определении эффективной и установочной мощности судовой силовой установки многофункционального ледокола учитывается многообразие ограничений, связанных как с толщиной форсируемого льда, так и с минимальной безопасной скоростью на открытой воде.

Несмотря на условность разных измерителей эксплуатационных качеств судна во льдах, при нахождении оптимальных характеристик на начальных этапах его проектирования, эти качества рассматриваются с позиции различных критериев, включая следующие:

- способность форсировать сплошное ледовое поле определенной толщины;
- достаточную мощность для движения судна в сплоченном битом льду с учетом удовлетворительной управляемости в этих условиях;
- достаточную для условий форсирования льда прочность обшивки и перекрытий корпуса как в оконечностях судна, так и на уровне ледового пояса при обжатию корпуса с бортов, и другие критерии качеств судна во льдах.

В рамках системного подхода определяется иерархия показателей из числа названных или иных, в соответствии с которой можно придерживаться наиболее важного из них как ограничения при нахождении проектных характеристик многофункционального ледокола.

7.6. Уравнения баланса характеристик многофункционального ледокола, устанавливающие между характеристиками или между той или иной характеристикой и ее независимой частью зависимости от заданного явно или неявно приращения полезной нагрузки, то есть приращения заданного как слагаемое проектного

дедвейта или как функция судна, предписываемая проектным ограничением, используются в конечном виде и в дифференциальной форме для нахождения приращения размера многофункционального ледокола, когда в качестве размера рассматривается водоизмещение в грузу.

7.7. При нахождении проектных характеристик многофункциональных ледоколов, которые преимущественно создаются на бюджетные субсидии, логично использование критериев эффективности, основанных на оценке минимизируемых затрат, в то же время нужно учитывать поправки и возможности получения корпоративного (внебюджетного) дохода при использовании судна на условиях хозяйственного расчета.

7.8. Целевая функция выступает обобщением показателей: единовременных инвестиций в создание многофункционального ледокола и ежегодных эксплуатационных затрат, а также уменьшающей ежегодные затраты поправки по учету возможного внебюджетного дохода, и зависит от переменных, исходных данных и параметров, от которых также зависит показатель эффекта в форме функции полезности.

7.9. Показатель эффекта в составе критерия на начальных этапах проектирования многофункционального ледокола характеризует как полезность судна для обслуживания во льдах судов, не имеющих ледовую категорию или имеющих несущественную ледовую категорию, так и собственную автономную транспортную или иную работу в ледовых условиях.

Характеристика размера многофункционального ледокола, с одной стороны, показывает его полезные качества в ледовых условиях, объем оказываемых судном навигационных услуг во льдах, в частности размер создаваемого канала в ледовом поле, с другой стороны, может характеризовать имеющееся на судне пространство для расположения не только грузов, но и указанных в техническом задании функциональных частей судна, применяемых для осуществления спасательных, патрульных или иных задач, базирования погружаемого оборудования, вертолетов и др.

7.10. Предписанная в задании на проектирование толщина форсируемого сплошного ледового поля, относящаяся к исходным данным, то есть служащая проектным ограничением, также связана с ледовой категорией судна или с ледокольным классом, то есть означает, как данное для проектирования, так и характеристику многофункционального ледокола.

7.11. Фактор инвестиционного ограничения по размеру бюджетных субсидий учитывается поправкой к целевой функции. С учетом симметричности подхода помимо штрафной поправки к критерию оптимальности применяется также премиальная поправка при экономии бюджетных субсидий, когда можно было бы создать более компактное судно, которое, тем не менее, отвечало бы всем проектным ограничениям, включая инвестиционное ограничение, и было бы в таком компактном размере оптимальным многофункциональным ледоколом по применяемому критерию.

7.12. Оптимальные характеристики многофункционального ледокола, устанавливаемые на начальных этапах его проектирования, должны обладать достаточной устойчивостью, а предполагаемые в будущем изменения условий не должны отрицать выбор оптимальных проектных характеристик судна. Вариантные расчеты с использованием разработанных математических моделей подтверждают устойчивость найденных оптимальных проектных характеристик многофункционального ледокола, которые определены в соответствии с принципами системного подхода с использованием надлежащей целевой функции и проектных ограничений.

### Литература

1. Ионов Б.П., Грамузов Е.М., Зуев В.А. Проектирование ледоколов. СПб. : Судостроение, 2014. 512 с.
2. Федеральная целевая программа «Развитие транспортной системы России (2010–2030 годы)». Утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 05 декабря 2011 г. № 848-в.
3. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V., Khromchenko E.B. The objective function for determining of design characteristics of multipurpose ship for navigation in icy sea, the methodological constraints, the optimality criterion. The 30th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, TEAM-2016, Mokpo, Korea – P. 561–573.
4. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Defining of the utility function and its use as the part of the optimality criterion in determining of design characteristics of multipurpose ice navigation ship // The 31st Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2017. Osaka, 25–28 September 2017, Osaka, Japan: Program and Proceedings, 2017. P. 119.
5. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Dependence of displacement on the functions in ice field of multipurpose ship // The 29th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2015. Vladivostok, Russia. P. 95–104, ISBN 978–5–8343–0960–4
6. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Determination of project characteristics of merchant ship using economic criteria, objective functions and concepts of systematic approach // BIT's 4th Annual World Congress of Ocean (WCO). Symposium 7: Traditional Ocean Industry. Qingdao, China, 2015, November 6–8. P. 76–77.
7. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V., Khromchenko E.B. Determination of load and displacement in the design of multipurpose ice navigation ship // The 29th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2015. Vladivostok : Russia. P. 80–86.
8. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V., Khromchenko E.B. The objective function for determining of design characteristics of multipurpose ship for navigation in icy sea, the methodological constraints, the optimality criterion // The 30th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2016. Mokpo, Republic of Korea : 10–13 October 2016. Mokpo: Publishing house of Mokpo National University, 2016. P/ 561–573.
9. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V., Kulesh V.A. Safety of ships navigation in ice and operational effectiveness // Proceedings of the Twenty-third (2013) International Offshore and Polar Engineering. International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE). Anchorage, Alaska, USA, June 30–July 5, 2013. P. 1227–1234.
10. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Multilevel systemic approach in the determining of the optimal design characteristics of ice navigation ship // The 31st Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2017. Osaka, 25–28 September 2017. Osaka: Publishing of Osaka University and Osaka Prefecture University, 2017. P. 118.
11. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. The dependences of displacement on icebreaking characteristics in designing of ship for navigation in freezing seas // The Twelfth (2016) Pacific-Asia Offshore Mechanics Symposium. PACOMS-2016. International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE). Gold Coast, Australia, October 4–7, 2016. P. 570–577.
12. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. The innovative ships for navigation in Arctic seas // Northern Maritime Forum 2017. Qingdao, China: 2017. P. 463–474.

### References

1. Ionov B.P. The designing of the icebreakers / Ionov B.P., Gramuzov E.M., Zuyev V.A. – S.–Pb.: Publishing house Shipbuilding, 2014. – 512 p.
2. Federal program «Shipbuilding Industry Development for the period of 2013–2030», approved by the Order of the Government of Russia of December 24, 2012, # 2514–p.
3. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V., Khromchenko E.B. The objective function for determining of design characteristics of multipurpose ship for navigation in icy sea, the methodological constraints, the optimality criterion. The 30th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, TEAM-2016, Mokpo, Korea – P. 561–573.
4. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Defining of the utility function and its use as the part of the optimality criterion in determining of design characteristics of multipurpose ice navigation ship // The 31st Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2017. Osaka, 25–28 September 2017, Osaka, Japan: Program and Proceedings, 2017. P. 119.
5. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Dependence of displacement on the functions in ice field of multipurpose ship // The 29th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2015. Vladivostok, Russia. P. 95–104, ISBN 978–5–8343–0960–4
6. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Determination of project characteristics of merchant ship using economic criteria, objective functions and concepts of systematic approach // BIT's 4th Annual World Congress of Ocean (WCO). Symposium 7: Traditional Ocean Industry. Qingdao, China, 2015, November 6–8. P. 76–77.



7. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V., Khromchenko E.B. Determination of load and displacement in the design of multipurpose ice navigation ship // The 29th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2015. Vladivostok : Russia. P. 80–86.
8. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V., Khromchenko E.B. The objective function for determining of design characteristics of multipurpose ship for navigation in icy sea, the methodological constraints, the optimality criterion // The 30th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2016. Mokpo, Republic of Korea : 10–13 October 2016. Mokpo: Publishing house of Mokpo National University, 2016. P/ 561–573.
9. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V., Kulesh V.A. Safety of ships navigation in ice and operational effectiveness // Proceedings of the Twenty-third (2013) International Offshore and Polar Engineering. International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE). Anchorage, Alaska, USA, June 30–July 5, 2013. P. 1227–1234.
10. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Multilevel systemic approach in the determining of the optimal design characteristics of ice navigation ship // The 31th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2017. Osaka, 25-28 September 2017. Osaka: Publishing of Osaka University and Osaka Prefecture University, 2017. P. 118.
11. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. The dependences of displacement on icebreaking characteristics in designing of ship for navigation in freezing seas // The Twelfth (2016) Pacific-Asia Offshore Mechanics Symposium. PACOMS-2016. International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE). Gold Coast, Australia, October 4–7, 2016. P. 570–577.
12. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. The innovative ships for navigation in Arctic seas // Northern Maritime Forum 2017. Qingdao, China: 2017. P. 463–474.

УДК 629.12.001.24

## ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК СУДОВ С УЧЁТОМ ЛЕДОВЫХ КАТЕГОРИЙ

**Виктор Анатольевич Кулеш**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Кораблестроения и океанотехники  
Дальневосточный федеральный университет  
690091, Владивосток, ул. Суханова. 8  
тел. 8-8098-689-038; e-mail: vkulesh@mail.ru

**Татьяна Игоревна Бессонова**

магистрант кафедры Кораблестроения и океанотехники  
Дальневосточный федеральный университет  
690091, Владивосток, ул. Суханова. 8  
тел. 8-999-615-3582; e-mail: bess95@list.ru

### Аннотация

Пополнение российского флота осуществляется как за счёт судов отечественной постройки, так и зарубежной. Ледовая категория является одной из важнейших характеристик, определяющих эксплуатационные возможности судов. Потребность в судах ледового плавания стабильно растёт с учётом интенсивности освоения шельфа замерзающих морей и развития Северного морского пути. При определении основных характеристик таких судов с учётом ледовых категорий важно принимать во внимание тенденцию роста дедвейта и необходимость ледокольного сопровождения. В области транспортных судов высших российских ледовых категорий пока нет опыта постройки. В работе рассмотрены вопросы оценки основных характеристик ледоколов и судов ледового плавания во всём диапазоне ледовых категорий. Статистические данные базируются на Регистровой книге, а в области высоких значений опираются на научно-исследовательские работы. Для ледоколов водоизмещение и ледопроездимость определяются в зависимости от мощности энергетической установки. Главные размеры связаны с водоизмещением. Транспортные суда рассмотрены на примере танкеров. В качестве входных параметров выступают ледовая категория и дедвейт. Результаты расчётов сравниваются с системой ледовой классификации Регистра и с характеристиками судов. Результаты работы могут использоваться на ранних стадиях проектирования и при планировании пополнения флота.

**Ключевые слова:** ледоколы, суда ледового плавания, характеристики, ледопроездимость

## ASSESSMENT OF THE CHARACTERISTICS OF SHIPS WITH ACCOUNT OF THE ICE CATEGORIES

**Victor A. Kulesh**

Professor, Dr. Sci. Tech.  
Professor of Shipbuilding Department  
Far Eastern Federal University  
8, Sukhanova st., 690091, Vladivostok, Russia  
tel.: 8-9089-686-038; e-mail: vkulesh@mail.ru

**Tatiana I. Bessonova**

Graduate student of Shipbuilding Department  
Far Eastern Federal University  
8, Sukhanova st., 690091, Vladivostok, Russia  
tel.: 8-999-615-3582; e-mail: bess95@list.ru

### Abstract

Replenishment of the Russian fleet is carried out both at the expense of ships of domestic construction, and foreign. The ice category is one of the most important characteristics that determine the operational capabilities of ships. The need for ice navigation ships is steadily growing considering the intensity of the development of the shelf of the freezing seas and the development of the Northern Sea Route. In determining the main characteristics of such ships with the ice category is important to take into account the tendency of growth of deadweight and the need for icebreaking support. In the field of transport ships of the highest Russian ice categories there is no experience of construction.

The paper considers the assessment of the main characteristics of icebreakers and ice ships in the whole range of ice categories. The statistical data are based on the Register book, and in the high values are based on the research works. For icebreakers displacement and ice passability are determined depending on the power of the propulsion system. The main dimensions are related to the displacement. Transport ships are considered by the example of tankers. The input parameters are the ice category and the deadweight. The results of the calculations are compared with the ice classification system of the Register and with the characteristics of the ships. The results can be used in the early stages of design and planning the replenishment of the fleet.

**Key words:** icebreakers, ice navigation ships, characteristics, ice cross ability

**1. Общие сведения**

Ледовые условия морей и рек России являются одним из важнейших факторов, сдерживающих темпы развития транспортных процессов, промышленного потенциала и освоение природных ресурсов. Большинство портов России замерзающие и вынуждены вводить режимы ледовых навигаций, ограничивающие или запрещающие эксплуатацию судов с недостаточным уровнем ледовых качеств.

Освоение и развитие Арктических регионов и шельфа, а также планы обеспечения круглогодичной навигации по трассам Северного морского пути (СМП) ставят задачи создания новых специализированных полярных судов и ледоколов. В России накоплен опыт проектирования, постройки и эксплуатации судов ледового плавания (СЛП). При этом важная роль традиционно отводилась ледоколам и их сопровождениям – проводке судов (Рис.1). Движение судов за ледоколом очевидно снижает сопротивление судов и эксплуатационные расходы на топливо.



*Рис.1. Пример индивидуальной проводки полярного судна ледоколом*

В последние годы наметились тенденции значительного роста дедвейта и размеров транспортных судов для плавания во льдах, который опережает рост характеристик ледоколов.

Попытки минимизировать зависимость полярного судоходства от ледокольного флота приводят к поиску новых решений, например, к судам двойного действия (DAS – Double Acting Ship). Однако без сочетания инноваций с опытом трудно обеспечить необходимый уровень безопасности процессов ледового плавания.

Ледовые повреждения корпусов судов невысоких ледовых категорий наиболее характерны при самостоятельном плавании в битых льдах. Иногда такие повреждения имеют тяжелые формы и требуют вывода судна из эксплуатации (Рис. 2). Также известны случаи ледового плена и гибели судов в сплошных льдах Арктики.

В мировом судостроении ледоколы и суда ледового плавания занимают особое место. Ледовые усиления судов при равном дедвейте могут значительно увеличивать вес судов и мощность энергетической установки (ЭУ). Эффективность эксплуатации таких судов на чистой воде соответственно снижается.

Развитие России и судоходства во льдах, а также освоение природных ресурсов ставят задачи планирования пополнения флота новыми ледоколами и судами ледового плавания с минимальными затратами и при максимальной эффективности. Для решения таких задач важны методики оценки основных характеристик судов к

началу их проектирования и постройки. При этом в максимальной степени нужно учитывать опыт и направления развития флота.



*Рис.2. Пример тяжёлых ледовых повреждений судна при самостоятельном плавании*

В данной работе основное внимание уделено ледоколам всех типов и наливным судам, размеры которых достигают наибольших значений. Охвачен весь диапазон ледовых категорий Российского Морского Регистра Судоходства (РМРС) [1]. За основу приняты данные Регистровой книги по состоянию до введения новой ледовой классификации. Для верификации полученных формул дополнительно использованы данные по другим судам и результаты научно-исследовательских работ.

**2. Ледоколы**

В основу статистического анализа положены данные Регистровой книги по 24 ледоколам – от небольших портовых до линейных атомных. Данные охватывали все 4 ледовые категории РМРС для ледоколов. Предварительный анализ показал, что особенности линейных ледоколов (мощностью ЭУ более 20 МВт) и отличия от портовых ледоколов не позволяют получить общую зависимость с высокой степенью достоверности аппроксимации (R<sup>2</sup>).

В результате при заданной мощности ЭУ (кВт) оценку водоизмещения (т) ледоколов можно произвести по формуле

Полученная связь указанных характеристик отражена на Рис. 3 и в Таблице 1.

Связи основных геометрических характеристик корпусов ледоколов также получены и могут быть оценены по формулам, представленным ниже. Расчётная длина (м) в зависимости от водоизмещения (т) ледоколов

$$L = 2,5123 \cdot D^{0,3966}, R^2 = 0,99. \tag{2}$$

Ширина (м) в зависимости от расчётной длины (м) ледоколов

$$B = 1,4205 \cdot L^{0,6154}, R^2 = 0,94. \tag{3}$$

Осадка (м) в зависимости от расчётной длины  $d = 0,2125 \cdot L^{0,7938}$ ,  $R^2 = 0,87$ . (4)

Таблица 1

Расчеты качеств ледоколов

Мощность ЭУ	МВт	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80
Водоизмещение	т	3323	7497	12066	16821	19253	21190	22825	24254	25532	26693
Длина расчётная.	м	62,6	86,5	104,4	119,1	125,7	130,6	134,5	137,7	140,6	143,1
Ширина	м	18,1	22,1	24,8	26,9	27,8	28,5	29,0	29,4	29,8	30,1
Осадка	м	5,7	7,3	8,5	9,4	9,9	10,2	10,4	10,6	10,8	10,9
Ледопроеходимость	м	0,71	1,00	1,22	1,41	1,73	2,00	2,24	2,45	2,65	2,83
Правила РМРС	Ледопроеходим.	до 1 м		до 1,5 м		до 2 м		более 2 м			
	Мощность на валах	менее 11 МВт		более 11 МВт		более 22 МВт		более 48 МВт			
	Классификация	Ice breaker 6		Ice breaker 7		Ice breaker 8		Ice breaker 9			

$$D = \min \left( 0,1511 \cdot Ne^{1,1739} \right. \\ \left. 621,12 \cdot Ne^{0,3331} \right), R^2 \geq 0,93. \quad (1)$$

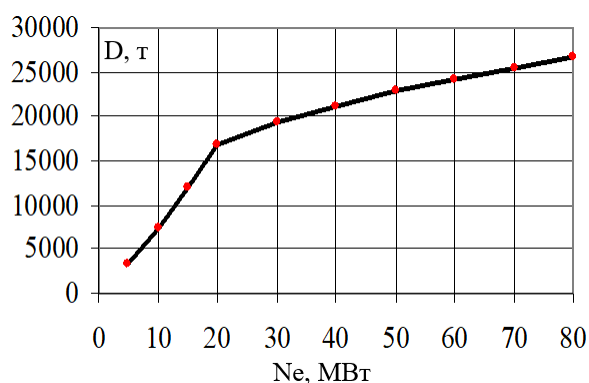


Рис.3. Связь водоизмещения и мощности ледоколов

Важнейшей характеристикой для ледоколов является ледопроеходимость (h, м). За ледопроеходимость принимается «максимальная толщина ровного льда, в котором судно может идти устойчивым ровным ходом, при этом прочность льда равна 500 кПа, а слой естественного снежного покрова равен 20-25 см» [2]. Минимальная скорость устойчивого ровного хода в сплошных льдах по российским стандартам около 2 узлов.

Ледопроеходимость (м) судов и ледоколов, например Л.Г. Цой, предложил определять в зависимости от совокупности нескольких параметров по формуле

$$h = \frac{0,07 \cdot \cos^{3/2} \varphi \cdot \sin^{1/2} \left( \frac{\alpha_0 + \beta_0 + \beta_2}{3} \right)}{\sin^{3/2} (90^\circ - \beta_{10})^2 \cdot \sqrt[5]{f_d} \cdot \sqrt[5]{L/B}} \cdot \sqrt[5]{D \cdot \sqrt{P_e / B}} \quad (5)$$

где  $\varphi$  - угол наклона форштевня к горизонту, град.;

$\alpha_0$  - угол грузовой ватерлинии на 0 теоретическом шпангоуте, град.;

$\beta_0, \beta_2, \beta_{10}$  - углы наклона борта на 0, 2 и 10 теоретических шпангоутах, град.;

$f_d$  - коэффициент динамического трения корпуса о лёд;

$L, B$  - длина и ширина корпуса судна по конструктивной ватерлинии, м;

$D$  - водоизмещение, т;

$P_e$  - тяга на винтах, т.

Формула (5) довольно громоздкая, требует ряда исходных данных, которых нет на ранних стадиях проектирования. С целью упрощения она модифицировалась другими авторами, но углы обводов корпуса оставались в структуре формул. С другой стороны Правила РМРС, опираясь на традиции, ограничивают углы обводов в зависимости от ледовой категории.

Статистические исследования корреляции величин проектной ледопроеходимости ледоколов с указанными характеристиками и размерами, а также их комбинациями по типу формулы (5), не выявили чётких преимуществ.

Высокое значение  $R^2$  обеспечивается по формуле (6)

$$h = 0,01 \cdot \sqrt{Ne} \quad R^2 = 0,97 \quad (6)$$

где  $Ne$  - мощность ЭУ, кВт.

Результаты расчётов ледопроеходимости по формуле (6) и сравнения с проектными величинами на примере 7-ми ледоколов представлены в Таблице 2 и на Рис. 4.

Таблица 2

Сравнения характеристик и ледовой проходимости ледоколов

Характеристика	Названия ледоколов						
	Ленин	Арктика	Москва	Ермак	К.Сорокин	Мудьюг	Таймыр
Длина по КВЛ, м	124	136	112,4	130	121,3	73,5	140,8
Водоизмещение, т	19240	23460	13290	20241	14914	5558	19600
Мощность ЭУ, кВт	32300	55100	19120	30400	18180	10000	37500
Мощность на валах, кВт	28820	49600	16180	26470	16180	7000	32500
Тяга, т	330	480	226	320	181	87	295
Скорость, узл	19,7	20,8	18,3	19,5	19,4	17,4	20,2
	Ледопроходимость, м:						
Проектная	1,65	2,25	1,45	1,80	1,35	0,95	2,00
<b>Расчетная</b>	<b>1,80</b>	<b>2,35</b>	<b>1,38</b>	<b>1,74</b>	<b>1,35</b>	<b>1,00</b>	<b>1,94</b>
Отличие, %	8,9	4,3	-4,6	-3,1	-0,1	5,3	-3,2

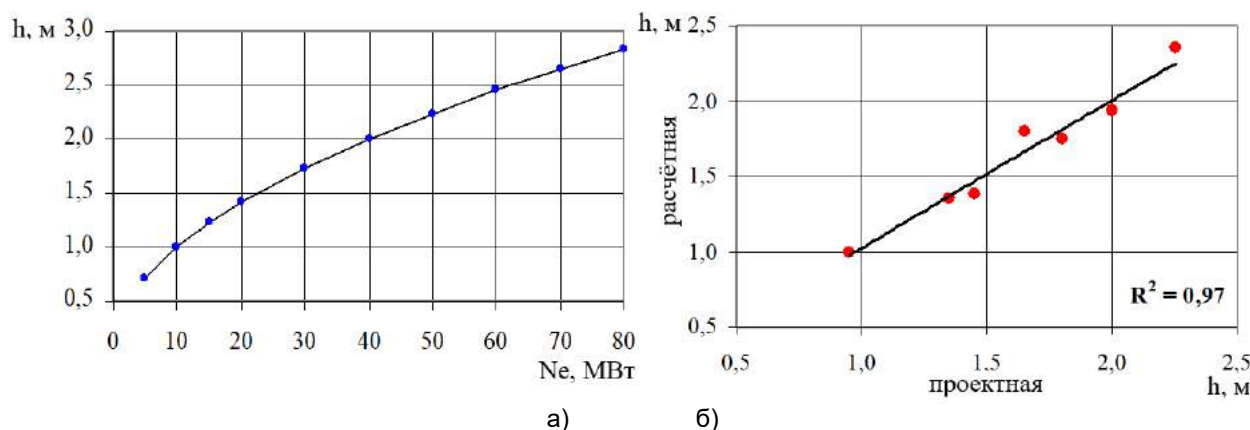


Рис.4. Расчётная ледопроходимость ледоколов в зависимости от мощности ЭУ (а) и её связь с проектной ледопроходимостью по данным 7 ледоколов (б)

Полученные формулы и представленные результаты обеспечивают возможность оценок основных характеристик ледоколов с традиционными обводами по заданной мощности ЭУ во всём диапазоне размеров, назначений и ледовых категорий.

### 3. Суда ледового плавания

В основу статистического анализа характеристик СЛП положены данные Регистровой книги по 167 судам с назначением - «нефтеналивное». Данные охватывали танкера с ледовыми категориями не выше УЛ ≈ Arc5 и с водоизмещением не более 30 000 тонн. Это определило необходимость экстраполяции характеристик судов в область более высоких ледовых категорий – до Arc9 и водоизмещений – до 120 000 тонн. В этой области опыт проектирования и постройки судов незначительный, а на её границах отсутствует. Однако исследования в этой области начались. Например, в работе [3] были рассмотрены перспективы постройки судов-газовозов для Арктики

в диапазоне водоизмещений от 80 000 до 90 000 тонн.

Для транспортных судов наиболее важной характеристикой является дедвейт (DW). Стоимость постройки судов в первую очередь связана с их весом - водоизмещением порожнем (D0). На Рис.5 представлена связь этих характеристик для судов без ледовой категории (Ice0) и для судов с ледовой категорией Arc5. Как видно, при одинаковом дедвейте 50 000 тонн танкер с категорией Arc5 по весу может в 1,5 раза превосходить танкер без ледовой категории.

Аналогичная картина относится и к связи мощности ЭУ с водоизмещением танкеров (Рис. 6). Здесь видно, что с увеличением ледовой категории увеличивается и показатель достоверности аппроксимации – R<sup>2</sup> с 0,84 до 0,999. Причина может быть в том, что суда с категорией Arc5 проектировались по российским стандартам, а суда без ледовой категории в разных странах.

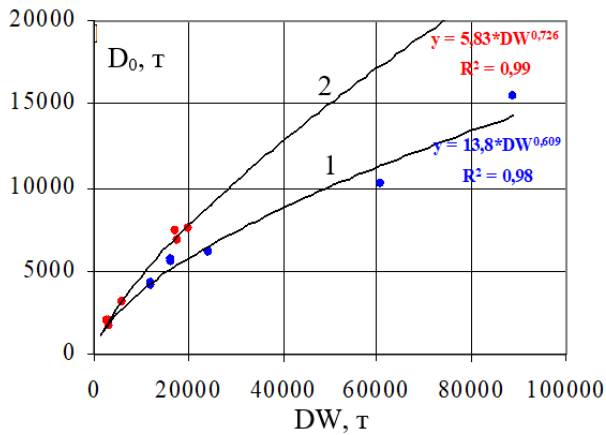


Рис.5. Связь веса судов порожнем и дедвейта при отсутствии ледовой категории (1) и для категории Arc5 (2)

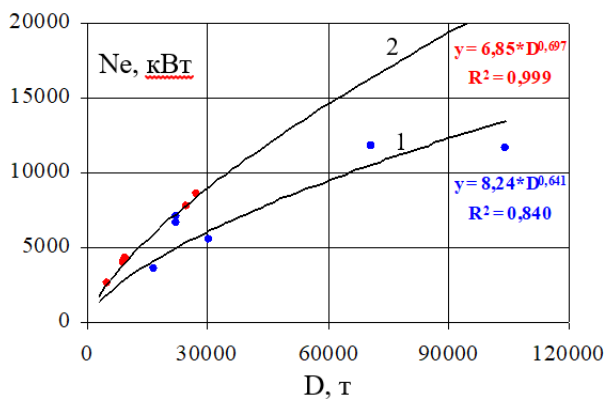


Рис.6. Связь мощности ЭУ судов и водоизмещения при отсутствии ледовой категории (1) и для категории Arc5 (2)

Расчёты показали, что в диапазоне ледовых категорий от 0 до 5 регистровые суда дедвейтом до 20 000 тонн увеличивают свой вес порожнем в среднем примерно на 5% за каждый уровень категории. С увеличением дедвейта и ледовой категории более Arc5 дополнительно учитывались данные работы [3].

В результате вес порожнем ( $D_0$ , т) наливных судов в зависимости от планируемого дедвейта ( $DW$ , т) и уровня ледовой категории ( $k_i$ ) можно оценить по формуле

$$D_0 = (13,81 \cdot DW^{0,609}) \cdot \max \left[ 1 + \frac{1}{(0,4222 \cdot DW^{0,117} - 1) \cdot k_i / 5} \right] \cdot \left[ 1 + 0,054 \cdot (k_i - 5)^{1,6394} \right] \quad (7)$$

for  $k_i > 5$

Результаты расчётов по формуле (7) и сравнения приведены на Рис. 7. Здесь также показаны верхняя оценка по газовазам из работы [3] и позиция крупного полярного танкера «Михаил Ульянов». Вес данного танкера с категорией Arc6 существенно выше расчётного по формуле (7). Причина может быть в том, что в данном проекте не удалось достигнуть оптимального сочетания веса судна и мощности ЭУ.

Мощность ЭУ ( $N_e$ , кВт) в зависимости водоизмещения ( $D$ , т) и уровня ледовой категории ( $k_i$ ) можно оценить по формуле

$$N_e = (8,24 \cdot D^{0,641}) \cdot \left( 1 + 0,0723 \cdot D^{0,182} \cdot k_i / 5 \right) \cdot \left[ 1 + 0,095 \cdot (k_i - 5)^{1,502} \right] \quad (8)$$

for  $k_i > 5$

где  $D = DW + D_0$ , т.

Результаты расчётов по формуле (8) и сравнения приведены на Рис. 8. Здесь также показаны позиции 5-ти танкеров и оценки из работы [3] по 5-ти газовазам. Обозначение – 5 на Рис. 8 относится к упомянутому танкеру «Мих. Ульянов» и показывает, что мощность его ЭУ близка к расчётной для категории Arc6. Таким образом, корпуса танкеров данного проекта излишне утяжелены (Рис. 7) или мощность занижена.

Сравнения результатов расчётов по другим танкерам и с оценками [3] для газовазов показывают хорошее согласование.

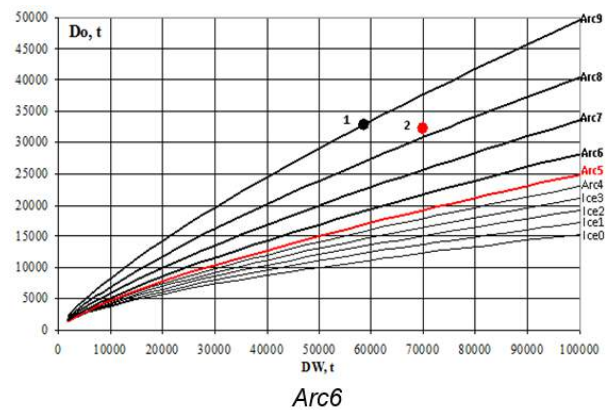


Рис. 7. Сводная диаграмма зависимостей веса порожнем и дедвейта наливных судов во всём диапазоне ледовых категорий РМРС: 1 – оценка [3] для газоваза Arc9; 2 – танкер «М. Ульянов»

Связи основных геометрических характеристик корпусов танкеров получены и могут быть оценены по формулам, представленным ниже. Расчётная длина (м) в зависимости от водоизмещения (т) танкеров

$$L = 5,8905 \cdot D^{0,3215}, \quad R^2 = 0,89. \quad (9)$$

Ширина судна (м) в зависимости от водоизмещения (т) (см. Рис. 9)

$$B = 1,1676 \cdot D^{0,2938}, \quad R^2 = 0,97. \quad (10)$$

Осадка (м) в зависимости от водоизмещения (т) танкеров

$$d = 0,2344 \cdot D^{0,3587}, \quad R^2 = 0,77. \quad (11)$$

Высота борта (м) в зависимости от водоизмещения (т) танкеров



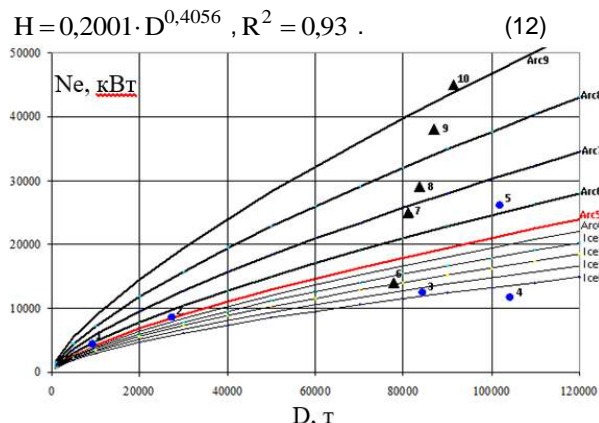


Рис. 8. Диаграмма зависимостей мощности ЭУ от водоизмещения наливных судов во всём диапазоне ледовых категорий РМРС: 1-5 – реальные танкеры под классом РМРС

Ледопроеходимость танкеров (м) в зависимости от упора винтов (т) и ширины (м) можно оценить по формуле из работы [4]

$$h = 0,45 \cdot \sqrt{P_e / B} \quad (13)$$

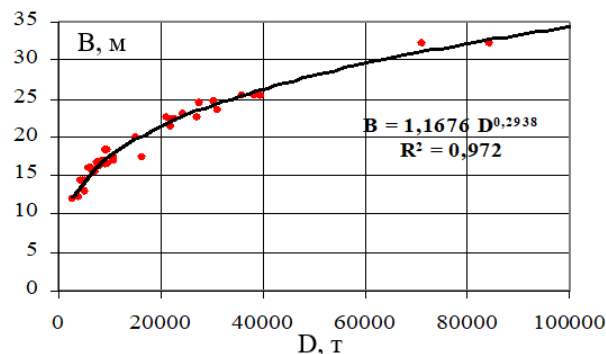


Рис. 9. Связь водоизмещения и ширины танкеров

### Заключение

Полученные зависимости обеспечивают возможность оперативной оценки параметров ледоколов и танкеров ледового плавания. Они могут быть полезны для сравнения судов и технико-экономических обоснований пополнения флота. В последнем случае на первый план выходят вопросы безопасности и эффективности эксплуатации, которые обсуждались ранее [5], но выходят за рамки данной работы.

### Литература

1. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург. 2018.
2. Климашевский С.Н. Расчёт ледопроеходимости ледоколов и судов ледового плавания, анализ параметров формы корпуса этих судов. Судостроение, №3, 2012. С. 11-15.
3. Таровик О.В. Методика определения масс конструкций ледовых усилений транспортных судов на ранних стадиях проектирования. Диссертация канд. техн. наук. ФГУП Крыловский государственный научный центр. СПб. 2015. 186 с.
4. Эксплуатация судов в полярных водах: Учебное пособие / Кулеш В.А., Лентарёв А.А., Шарлай Г.Н., Мотрич В.Н., Монинец С.Ю.; под ред. А.А. Лентарёва. –М., МОРКНИГА, 2018. – 277 с.
5. Kulesh V., Ogay S., Voyloshnikov M. Safety of Ships Navigation in ice and Operational Effectiveness. Proceedings of the Twenty-third International Offshore and Polar Engineering. Vol. 1. Anchorage, Alaska, USA. 2013. P.1227-1234.

### References

1. Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg., 2018. Rules for the classification and construction of sea-going ships.
2. Klimashevsky S.N., 2012. Calculation of ice passability of icebreakers and ice navigation ships, analysis of the shape parameters of the hull of these ships. Shipbuilding, №3, 11-15.
3. Tarovik O.V., 2015. Method for determining the masses of structures of ice reinforcement of transport ships at the early stages of design. Thesis of Cand. tech. sciences. FSUE Krylov State Research Center. St. Petersburg, 186.
4. Kulesh VA, Lentarev AA, Sharlay GN, Motrich VN, Moninets S.Yu .; Ed. A.A. Lentarev. -M, Morkniga, 2018. Exploitation of ships in polar waters: Textbook, 277.
5. Kulesh V., Ogay S., Voyloshnikov., 2013. M. Safety of Ships Navigation in ice and Operational Effectiveness. Proceedings of the Twenty-third International Offshore and Polar Engineering. Vol. 1. Anchorage, Alaska, USA, 1227-1234.

УДК 657.922; 338.517.2

## ПРЕДМЕТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СОСТАВ ХАРАКТЕРИСТИК НАКАТНЫХ ГРУЗОПАССАЖИРСКИХ СУДОВ

**Михаил Владиленович Войлошников**доктор технических наук, профессор  
главный научный сотрудникМорской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: 8-914-705-6029; e-mail: michael.vladlen@gmail.com**Сергей Алексеевич Огай**доктор технических наук, доцент  
ректорМорской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: (423) 241–49–68; e-mail: ogay@msun.ru

### Аннотация

Морские грузопассажирские перевозки на малые и средние расстояния выдерживают конкуренцию с авиационными перевозками ввиду возможности попутной с пассажирами доставки грузов или автомобилей и ввиду возможностей доставки на малооборудованное побережье, на котором отсутствуют аэродромы. Эти факторы определяют конструктивное и функциональное многообразие грузопассажирских судов RO–PAX, которые тем не менее охватываются в совокупность многоцелевых транспортных судов, пригодных для перевозки пассажиров и накатной техники. Проектные характеристики судов этого типа определяются методами оптимизации по экономическим критериям в рамках системного подхода, при этом учитываются соответствующие ограничения. Для нахождения проектных элементов применяются собственные расчетные методики и модели, относящиеся к той или иной подсистеме судна. В качестве критериев оптимальности при проектировании грузопассажирских паромов могут применяться экономические показатели, связанные с максимизируемой прибылью и рентабельностью. Судно при проектировании рассматривается в составе комплекса судоходной компании, а инвестиционным ограничением служит стоимостная оценка активов этого комплекса.

**Ключевые слова:** грузопассажирское судно, RO–PAX, паром, оптимальные характеристики, проектные характеристики, проектные элементы, критерий оптимальности, проектное ограничение

## THE SUBJECT OF DESIGN AND THE SETS OF SOUGHT CHARACTERISTICS OF RO–PAX SHIPS

**Michael V. Voyloshnikov**Professor, Dr. Sci. Tech.  
Chief research scientistMaritime state university named Admiral Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: 8-914-705-6029; e-mail: michael.vladlen@gmail.com**Sergei A. Ogai**Associate professor, Dr. Sci. Tech.  
RectorMaritime state university named Admiral Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: (423) 241–49–68; e-mail: ogay@msun.ru

### Abstract

Sea freight transport for short and medium distances can withstand air transportation because of the possibility of cargoes or vehicles transportation along with passengers and because of the possibilities of delivery to little-equipped coast without airfields. These factors predetermine the structural and functional diversity of cargo and passenger ships RO–PAX, which are nevertheless covered by the set of multi-purpose cargo ships suitable for the transportation of passengers and rolling cargoes. The design characteristics of ships of this type are determined by optimization methods according to economic criteria within the framework of systematic approach, taking into account the relevant constraints. To find the design particulars one use the appropriate calculation methods and models related to the particular subsystem of ship. As the criteria for optimality in the design of cargo-passenger ferries the economic indicators attributed to the maximized profit or the interest rate can be used. When designing the ship is considered as part of complex of shipping company, and the capitalization value of this complex serves as the investment constraint.

**Key words:** cargo and passenger ship, RO–PAX, ferry, optimum performances, design characteristics, design particulars, optimality criterion, design constraint

**Введение**

Морские транспортные пассажирские перевозки на большие и средние расстояния в последние десятилетия в мире сократились практически до полного прекращения по причине конкурирования с авиационными перевозками, за исключением следующих направлений: круизные перевозки и обслуживание, которые не в полной мере можно было бы отнести к транспортной деятельности, перевозки на малые расстояния при отсутствии автомобильного или иного сообщения, в том числе, перевозки по воде в малонаселённых районах, а также перевозки пассажиров с сопровождаемым ими грузом, в том числе, перевозки авто пассажиров совместно со средствами автомобильного транспорта.

Причем указанные морские транспортные перевозки пассажиров и сопровождаемого груза или накатной техники, принимаемых через аппарели, осуществляемые на небольшие расстояния, обычно осуществляются паромными, которые можно отнести к числу пассажирских судов с определенными оговорками, поскольку эти накатные суда являются грузопассажирскими и обозначаются в информационных базах: RO-PAX или RO-RO ferry. В силу ряда обстоятельств обновление и пополнение флота паромов (накатных грузопассажирских судов) характеризуется позитивной динамикой, а также, обновляется конструкция создаваемых паромов. По этой причине требуется усовершенствование методов определения оптимальных характеристик на этапе проектирования накатных грузопассажирских судов.

Объектом является проектируемое многоцелевое судно с горизонтальной грузообработкой пригодное для перевозки накатных грузов и пассажиров. Судно рассматривается в составе судоходной компании и оценивается экономически на принципах хозяйственного расчета и самоокупаемости.

В качестве экономических критериев могут использоваться: внутренняя норма прибыли и чистая текущая стоимость, отнесенная к инвестициям.

**1. Проектные типы морских накатных грузопассажирских судов**

Конструкции морских грузопассажирских судов RO-PAX характеризуются большим разнообразием, что можно проиллюстрировать примерами, среди которых следующие:

1. Морской грузопассажирский паром для перевозки накатной техники и пассажиров на средние расстояния (Рис. 1). На подобных крейсерских (cruiser) паромах имеется большое количество кают, надстройка располагается в основной части по длине судна или в носовой части, машинное отделение и движители расположены в корме, грузовые аппарели в обеих оконечностях



Рис. 1. Грузопассажирский паром для перевозки на средние расстояния постройки Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG, Flensburg

Наиболее близкими к крейсерским паромам по конструктивному типу выступают три группы судов (2, 3 и 4): паромы-автомобилевозы, накатные суда типа RO-RO с возможностью перевозить пассажиров в той или иной мере и челночные паромы. Кроме этого, близкими в функциональном и конструктивном отношении выступают пассажирские суда, которые, кроме пассажиров могут перевозить сопровождаемые грузы и снабжение.

2. Паромы для промышленной перевозки автомобилей (автомобилевозы), например, для экспортной доставки новых автомобилей между портами промышленных центров в Европе, Америке и в Азии (Рис. 2) отличаются от грузопассажирских судов RO-PAX как размерами, так и соотношением объемов, отведенных для накатного груза и для пассажиров, поскольку перевозка пассажиров этими судами практически не осуществляется.



Рис. 2. Паром-автомобилевоз постройки предприятия Xiamen Shipbuilding Industry в Китае

3. Накатные суда с горизонтальной погрузкой RO-RO с носовым (Рис. 3 а) или кормовым (Рис. 3 б) расположением надстройки, как и паромы-автомобилевозы отличаются от грузопассажирских судов RO-PAX соотношением объемов, отведенных для накатного груза и для пассажиров, хотя суда с горизонтальной погрузкой RO-RO уступают паромам-автомобилевозам по объему груза, а в качестве груза может перевозиться не только серийная накатная техника, но и иной укрупненный унифицированный груз, принимаемый горизонтально по аппарелям.



(а)



(б)

Рис. 3. Суда с горизонтальной погрузкой RO-RO с носовым (а) или кормовым (б) расположением надстройки, постройки Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG

4. Морские грузопассажирские суда RO-PAX для перевозки накатной техники и пассажиров на малые расстояния (челночные паромы, Рис. 4).



Рис. 4. Челночный паром для перевозки на малые расстояния постройки Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG

Пассажиры челночного парома размещаются преимущественно в салонах, имеется небольшое количество кают. Двигатели расположены в обеих оконечностях. Судно симметрично относительно плоскости мидель-шпангоута.

Для осуществления перевозок накатной техники и пассажиров на малые расстояния современные челночные паромы характеризуются разнообразием размеров и с учетом соотношения погрузочного и ходового времени таких судов, находящегося в зависимости от расстояния, современные челночные паромы характеризуются разнообразием размеров (Рис. 5 а и б) и по габаритам обычно уступают крейсерским паромам, пригодным для доставки на средние расстояния с размещением пассажиров в каютах

Разнообразие конструкций морских грузопассажирских судов RO-PAX находится также в зависимости от приемлемого уровня затрат на топливо и от требований, связанных с ограничениями на выброс продуктов сгорания топлива, поскольку эти требования выходят на передний план при транспортировке пассажиров на относительно небольшие расстояния между населенными пунктами в пределах конкурентирования морских перевозок с авиационными.



(а)



(б)

Рис. 5. Челночные паромы, (а, б), отличающиеся размерами, проект LMG Marin

Современные паромы (Рис. 6 а и б) могут оснащаться силовыми установками нового типа, в качестве топлива, которых, используется сжиженный

природный газ (LNG) или газо-дизельными установками, которые характеризуются низким уровнем вредных выбросов.



(а)



(б)

Рис. 6. Проекты паромов, в качестве топлива, которых, используется сжиженный природный газ: (а) проекта Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG

и (б) проекта Rolls-Royce

Предлагается также использование сжиженного природного газа в качестве топлива для грузопассажирских судов RO-PAX, разрабатываемых для замерзающих морей (Рис. 7), а также, на паромах-автомобилевозах (Рис. 8).

Помимо применения сжиженного природного газа в качестве топлива, сокращение вредных выбросов и выравнивание нагрузки силовой установки при частых маневрированиях осуществляются применением на грузопассажирских судах RO-PAX гибридных силовых установок, в составе которых помимо генераторов с двигателями внутреннего сгорания и помимо электрических приводов двигателей, которыми зачастую служат поворотные винто-рулевые колонки Azipod, используются аккумуляторные накопители электроэнергии.



Рис. 7. Грузопассажирский паром для замерзающих морей, использующий в качестве топлива сжиженный природный газ, по проекту Deltamarin Оу, Финляндия



Рис. 8. Паром-автомобилевоз, использующий в качестве топлива сжиженный природный газ, по проекту Houlder's Marine Design Consultancy, Великобритания



Примером парома, оснащенного гибридной силовой установкой с аккумуляторными дополнительными источниками энергии, может служить судно «Victoria of Wight» Турецкой постройки (Рис. 8), особенностью которого также является применение электрических крыльчатых движителей повышающих маневренность этого парома.



Рис. 8. Паром «Victoria of Wight» компании Wightlink с гибридной силовой установкой

5. Быстроходные грузопассажирские суда RO-PAX, имеющие эксплуатационную скорость от 30 до 45 узлов, при относительно невысокой стоимости топлива могут экономически выигрывать у авиационных перевозок на небольшие расстояния с учетом того, что быстроходные паромы помимо пассажиров также осуществляют перевозку накатной техники. Быстроходные грузопассажирские суда RO-PAX характеризуются определенным конструктивным разнообразием, среди них представлены как однокорпусные скоростные паромы (Рис. 9), так и многокорпусные (Рис. 10), а также многокорпусные скоростные паромы с малой площадью ватерлинии.

Нужно заметить, что имеются ограничения по количеству принимаемого груза помимо пассажиров на быстроходные паромы. Это особенно характерно для небольших многокорпусных паромов (Рис. 9 б), а также для многокорпусных паромов с малой площадью ватерлинии (Рис. 11).

Нужно добавить, что быстроходные морские грузо-пассажирские паромы могут концептуально разрабатываться как двухрежимные и эксплуатироваться или в водоизмещающем режиме при экономической скорости от 15 до 25 узлов, так и в скоростном режиме (от 30 до 40 узлов) в зависимости от загрузки.



Рис. 9. Однокорпусное грузопассажирское судно по проекту компании Incat, Tasmania



(а)



(б)

Рис. 10. Проекты многокорпусных быстроходных паромов: (а) «Express 4» по проекту компании Austal, Австралия и (б) пассажирский паром по проекту компании Damen, Нидерланды



Рис. 11. Быстроходный грузопассажирский паром катамаранного типа с малой площадью ватерлинии компании Incat, Тасмания

Дальнейшим развитием концепции быстроходных морских грузо-пассажирских паромов можно считать суда на воздушной подушке или десантные экранопланы, которые по конструкции больше соответствуют грузовым гидросамолетам. Для погрузки – выгрузки также используется аппарель, а грузовое помещение непрерывно по длине судна.

Поскольку известна определенная конструктивная аналогия морских судов и самолетов, можно отметить, что среди гражданских судов наиболее близкими конструктивными аналогами самолетов являются именно быстроходные паромы, которые могут в составе силовой установки иметь газовые турбины, а корпус может полностью или частично изготавливаться из алюминиевых сплавов, что усиливает аналогию.

6. К числу грузопассажирских судов также можно отнести небольшие суда с малой осадкой, пригодные для доставки пассажиров и накатной техники на

необорудованный берег (Рис. 12).



*Рис. 12. Судно для доставки пассажиров и накатной техники на необорудованный берег (www.boatsonline.com.au)*

Вопрос об отнесении морских грузопассажирских судов RO-PAX как объектов проектирования к общему типу возникает при анализе и обзоре их проектов, показывающих большое разнообразие применяемых решений, которые охватывают как различие специализаций этих судов, в том числе по характеристике соотношения объема перевозимого груза и числа пассажиров, по районам и сезонам доставки накатных грузов и пассажиров, так различие вариантов общего расположения этих судов, в том числе использование многокорпусных компоновок, а также разнообразие типов применяемых силовых установок, в том числе возможности применения разных видов топлива и использование двигателей внутреннего сгорания дизельных и газо-дизельных, или газовых турбин, и использование гибридных силовых установок с аккумуляторными накопителями, применение электродвижения и электроманеврирования, различие применяемых для создания паромов корпусных конструкционных материалов, двухрежимность движения, включая как водоизмещающий режим так и скоростной, и учитывая разнообразие других применяемых решений, а также, принимая во внимание различия размеров судов этого типа.

В терминах проектирования судна практически все рассмотренные на примерах и перечисленные отличия морских грузопассажирских судов RO-PAX, а также иные, которые могли быть не охвачены обзором, обычно относятся к подсистемам судна, которые определяются или как физическая часть судна, обособленная функционально, или как целостное судно, исследуемое с позиций отдельного качества, что составляет предмет внутренней задачи проектирования судна – определение его проектных элементов [1–6, 9]. Как известно, проектные элементы судна, например, соотношения его размерений находятся в зависимости от его физических качеств [1, 3], в том числе, мореходных качеств, прочностных и иных.

В то же время, определение проектных характеристик, таких как водоизмещение судна и его составляющие, объем пассажирских и грузовых помещений, грузоместимость в единицах TEU, регистровая вместимость, скорость и мощность силовой установки и пр., которое осуществляется методами оптимизации в рамках системного подхода с применением проектных ограничений и критериев

как правило базируется не на использовании физических закономерностей, хотя они учитываются в форме модулей в составе используемых математических моделей, а на исследовании экономических свойств проектируемого судна, и в этом отношении может строиться на единой методологической основе определение проектных характеристик морских грузопассажирских судов RO-PAX, которые являются транспортными многоцелевыми: как грузовыми – для накатного груза, так и пассажирскими, хотя одна из этих функций, имеющаяся тривиально, может быть не выражены для специализированных судов смежных типов с RO-PAX (пассажирских паромов, накатных судов RO-RO, паромов-автомобилевозов), что подлежит учету в форме соответствующего ограничения при использовании математической модели для нахождения оптимальных проектных характеристик судна.

К числу характерных особенностей математических моделей, предназначенных для определения оптимальных проектных характеристик морских грузопассажирских судов RO-PAX, можно отнести наличие в составе модели в качестве основных ограничений не только уравнения баланса массы (водоизмещения), но и уравнения объемов, если речь идет о достаточно крупных судах, кроме паромов для коротких линий, поскольку грузы и пассажиры перевозятся обычно в помещениях, а в отношении грузов это связано с многоярусными грузовыми помещениями при большой вместимости судна, что характерно для паромов, перевозящих на средней дальности или для подобных судов при большой дальности рейса (для паромов-автомобилевозов и накатных[ судов RO-RO).

Кроме этого, в состав условий баланса для скоростных паромов может быть также включено уравнение энергетического баланса, а охват скоростных паромов в рамках этого типа судов связан с их целевым назначением по перевозке пассажиров, что с учетом конкурирования с авиацией устанавливает границы дальности и приемлемой длительности эффективной перевозки пассажиров морем, а также экономическую мотивацию увеличения эксплуатационной скорости и, соответственно, мощности силовой установки для сокращения длительности перевозки.

Таким образом, при определении оптимальных характеристик в процессе решения внешней задачи проектирования морского грузопассажирского судна RO-PAX могут применяться три типа условий баланса – уравнения масс, объемов и энергетического баланса судовой силовой установки и движителей, что позволяет сделать вывод о количестве искомым независимых характеристик парама и о трехмерности оптимизационной задачи для судна этого типа.

А три найденные оптимальные проектные независимые характеристики применяются на дальнейших этапах в качестве исходных данных при нахождении зависимых проектных характеристик и при определении проектных элементов морского грузопассажирского судна RO-PAX с учетом различия конструктивных решений и



соответствующего разнообразия используемых в этих задачах математических моделей.

При определении элементов и, в частности, при нахождении с точки зрения непотопляемости расстояния между поперечными непроницаемыми переборками нужно учитывать, что, не смотря на большую вместимость судна и кубатуру грузовых помещений накатные грузопассажирские суда в терминах Теории корабля являются низкобортными в смысле уровня палубы поперечных водонепроницаемых переборок, поскольку грузовые помещения непрерывны вдоль судна.

Это говорит о некотором различии в подходах в оценке морского грузопассажирского судна RO-PAX при определении его проектных характеристик и при нахождении проектных элементов и о соответствующем различии применяемых моделей на этапах внешнего и внутреннего проектирования судна.

## 2. Показатели эффективности и критерии оптимальности морских накатных грузопассажирских судов

При определении оптимальных проектных характеристик морского грузопассажирского судна RO-PAX с использованием экономических критериев судно оценивается как часть имущественного комплекса судоходной компании и порядке общего допущения анализируется обособленно от остального имущества компании (активов). Остальное имущество рассматривается как средство дополнительного обеспечения при инвестировании в обновление флота.

Для оценки эффективности морского грузопассажирского судна RO-PAX могут использоваться следующие экономические критерии [4, 5]:

*DCF* – максимизируемая текущая стоимость потока чистого операционного дохода, чистый дисконтированный доход (discounted cash flow);

*NPV* – максимизируемая чистая текущая стоимость (net present value);

*IRR* – максимизируемая внутренняя норма прибыли (internal rate of return);

*TR* – минимизируемый срок окупаемости инвестиций.

Размер субсидий определяется по оценке имущественного комплекса судоходной компании в пополнение флота которой планируется создание морского грузопассажирского судна RO-PAX. Критерии эффективности инвестиций: чистая текущая стоимость *NPV* и внутренняя норма прибыли *IRR* находятся в экономической зависимости от инвестиций в сумме рыночных затрат на постройку судна *RC* и потребности в пополнении оборотных средств *OC*, т.е.:  $RC + OC$ .

Некоторые показатели эффективности из числа упоминаемых являются взаимозависимыми или зависят от инвестиционного ограничения – необходимого размера субсидий для создания судна и его ввода в эксплуатацию.

В частности, критерий срока окупаемости инвестиций находится от показателя внутренней нормы прибыли:  $TR = 1/IRR$ , а чистая текущая стоимость соответствует разности чистого

дисконтированного дохода и инвестиций

$$NPV = DCF - (RC + OC).$$

Чистая текущая стоимость, отнесенная к инвестициям, увеличивается по мере роста дисконтированного чистого дохода *DCF* и равна

$$NPV / (RC + OC) = DCF / (RC + OC) - 1.$$

Критерии чистой текщей стоимости и внутренней нормы прибыли являются максимизируемыми и независимыми. При использовании двух независимых максимизируемых критериев возникает задача их согласования в составе обобщенного критерия. Для согласования независимых критериев с одинаковым порядком предпочтительности (максимизация) нужно привести независимые критерии к общей размерности и оценить степень важности каждого из критериев. Рекомендуется следующее соотношение для обобщения независимых частных максимизируемых экономических критериев чистой текущей стоимости *NPV* и внутренней нормы прибыли *IRR* в составе комплексного критерия

$$IRR + i \times (NPV / (RC + OC) + 1)$$

Ниже (Рис. 13 а и б) на диаграммах показаны примеры использования максимизируемых экономических критериев для выбора варианта проекта грузопассажирского судна (помимо новых проектов включены, также, варианты покупки судна на вторичном рынке).

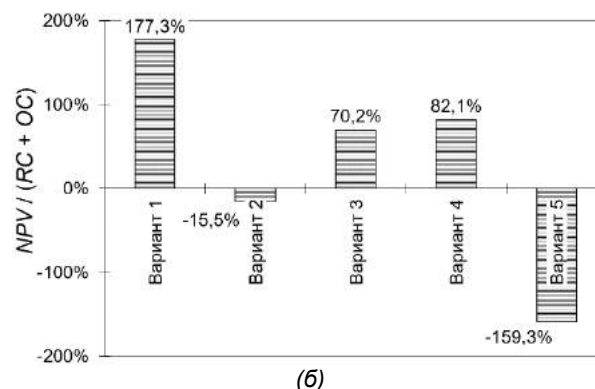
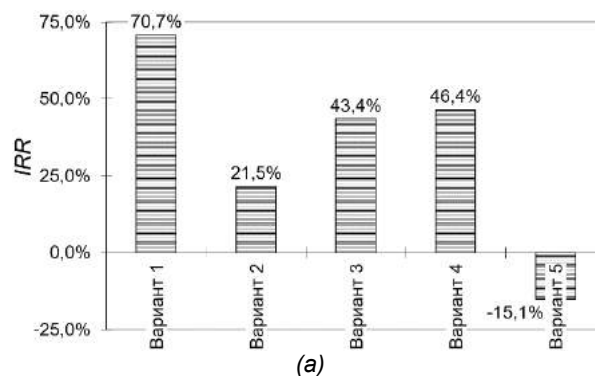


Рис. 13. Использование показателей внутренней нормы прибыли *IRR* (а) и показателя чистой текущей стоимости (б) в расчете на размер

*инвестиций NPV / (RC + OC). Условные обозначения:*

*вариант 1: паром (бывший в эксплуатации);*

*вариант 2: судно RO-RO вместимостью 397 TEU (бывшее в эксплуатации);*

*вариант 3: морской грузопассажирский паром (Рис. 1), постройки Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG, Flensburg, Germany;*

*вариант 4: накатное судно с горизонтальной погрузкой RO-RO (Рис 3 а) постройки Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG;*

*вариант 5: быстроходный морской грузопассажирский паром однокорпусный по проекту компании Incat Tasmania (Рис. 9)*

### Заключение

1. Морские грузопассажирские суда RO-PAX характеризуются большим конструктивным и функциональным разнообразием, что отражается на выборе подходов для проектирования судов этого типа.

В рамках задачи внешнего проектирования – при определении характеристик с применением системного подхода, методов и критериев для оптимизации и ограничений имеется определенное методологическое единообразие, поскольку все суда этого типа относятся к числу многоцелевых и пригодны в той или иной мере для перевозки

пассажиrow и морской техники. При определении проектных элементов этих судов требуется придерживаться собственных моделей и методик, относящихся к проектированию подсистем судна.

2. В состав основных проектных ограничений при нахождении проектных характеристик морского грузопассажирского судна RO-PAX входят три общих условия баланса: баланс водоизмещения, баланс основных объемов и энергетический баланс для быстроходных паромов.

Количество этих условий баланса говорит о размерности проектной оптимизационной задачи по числу независимых характеристик судна, выступающих переменными при оптимизации.

3. В качестве критериев оптимальности (целевых функций) при нахождении проектных характеристик морских грузопассажирских судов RO-PAX могут использоваться те или иные экономические показатели, связанные с максимизируемой прибылью и рентабельностью.

Судно при нахождении оптимальных проектных характеристик в системном отношении рассматривается в составе имущественного комплекса судоходной компании, чем предопределяется финансовое ограничение инвестора – по оценке его имущественного комплекса.

### Литература

1. Ашик В.В. Проектирование судов: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1985. 320 с.
2. Бронников А.В. Основные составляющие науки о проектировании судов // Судостроение. 1979. № 4. С. 3–6.
3. Бронников А.В. Проектирование судов: учебник. 2-е изд. перераб. и доп. Л. : Судостроение, 1991. 320 с.
4. Войлошников М.В. Модели оценки судов, активов морских предприятий и ресурсов океана: учеб. пособие М. : Общероссийская общественная организация «Российское общество оценщиков», 2010. 361 с.: ил.
5. Войлошников М.В. Морские ресурсы и техника: эффективность, стоимость, оптимальность. Владивосток : Изд-во ДВГТУ, 2002. 586 с.
6. Гайкович, А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов: в 2 т. Т. 1: Описание системы «Корабль». Т. 2: Анализ и синтез системы «Корабль». СПб. : Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014.
7. Захаров И.Г. Теория компромиссных решений при проектировании корабля. Л. : Судостроение, 1987.
8. Новосельцев Е.М., Войлошников М.В. Оценка потребностей и особенности подходов к проектированию пассажирских судов для Дальневосточного региона // Материалы междунар. конф. «Кораблестроение и океанотехника. Проблемы и перспективы» SOPP-98. Ч. 1. Владивосток : ДВГТУ, 1998.
9. Пашин В.М. Оптимизация судов. Л. : Судостроение, 1983.
10. Соколов В.П. Постановка задач экономического обоснования судов. Л.: Судостроение, 1987.
11. Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2020 года и на дальнейшую перспективу. Утверждена приказом Минпромэнерго России от 6 сентября 2007 г. № 354.
12. Экономическое обоснование проектных решений: пособие для конструктора-судостроителя: справ. / Н.И. Теретников, Н.П. Любушин, В.А. Бируля, А.Ф. Иконников; под общ. ред. Н.П. Любушина. Л. : Судостроение, 1990.
13. Barrass C.B. Ship design and performance for masters and mates. Marine engineering series. Butterworth-Heinemann, 2004. 252 p. (\*) ISBN 0750660007, 9780750660006.
14. Herbert Schneekluth, Volker Bertram Ship design for efficiency and economy. 2nd edition. Referex Engineering – Butterworth-Heinemann, 1998, 220 p., ISBN 0750641339, 9780750641333.
15. Taylor D.A., Tang Alan, Shung-tse Alan Merchant ship naval architecture – Institute of Marine Engineers, 2006. 216 p. (\*), ISBN 1902536568, 9781902536569.
16. Von Bertalanffy Ludwig General System theory: Foundations, Development, Applications – NY: George Braziller, revised edition 1976, ISBN 0–8076–0453–4.

### References

1. Ashik V.V. Proyecktirovaniye sudov: uchebnik. 2-ye izd., pererab. i dop. L.: Sudostroyeniye, 1985. 320 s.
2. Bronnikov A.V. Osnovnyye sostavlyayushchiye nauki o proyecktirovaniy sudov // Sudostroyeniye. 1979. № 4. S. 3–6.
3. Bronnikov A.V. Proyecktirovaniye sudov: uchebnik. 2-ye izd. pererab. i dop. L. : Sudostroyeniye, 1991. 320 s.
4. Voyloshnikov M.V. Modeli otsenki sudov, aktivov morskikh predpriyatiy i resurov okeana: ucheb. posobiye M. : Obshcherossiyskaya obshchestvennaya organizatsiya «Rossiyskoye obshchestvo otsenshchikov», 2010. 361 s.: il.

5. Voyloshnikov M.V. Morskiye resursy i tekhnika: effektivnost', stoimost', optimal'nost'. Vladivostok : Izd-vo DVGТУ, 2002. 586 s.
6. Gaykovich, A.I. Teoriya proyektirovaniya vodoizmeshchayushchikh korabley i sudov: v 2 t. T. 1: Opisanie sistemy «Korabl'». T. 2: Analizi sintez sistemy «Korabl'». SPb. : Izd-vo NITS MORINTEKH, 2014.
7. Zakharov I.G. Teoriya kompromisnykh resheniy pri proyektirovanii korablya. L. : Sudostroyeniye, 1987.
8. Novosel'tsev Ye.M., Voyloshnikov M.V. Otsenka potrebnostey i osobennosti podkhodov k proyektirovaniyu passazhirskikh sudov dlya Dal'nevostochnogo regiona // Materialy mezhdunar. konf. «Korablestroyeniye i okeanotekhnika. Problemy i perspektivy» SOPP–98. CH. 1. Vladivostok : DVGТУ, 1998.
9. Pashin V.M. Optimizatsiya sudov. L. : Sudostroyeniye, 1983.
10. Sokolov V.P. Postanovka zadach ekonomicheskogo obosnovaniya sudov. L.: Sudostroyeniye, 1987.
11. Strategiya razvitiya sudostroitel'noy promyshlennosti na period do 2020 goda i na dal'ney-shuyu perspektivu. Utverzhdena prikazom Minpromenergo Rossii ot 6 sentyabrya 2007 g. № 354.
12. Ekonomicheskoye obosnovaniye projektnykh resheniy: posobiye dlya konstruktora-sudostroitel'ya: sprav. / N.I. Teretnikov, N.P. Lyubushin, V.A. Birulya, A.F. Ikonnikov; pod obshch. red. N.P. Lyubushina. L. : Sudostroyeniye, 1990.
13. Barrass C.B. Ship design and performance for masters and mates. Marine engineering series. But-terworth–Heinemann, 2004. 252 p. (\*) ISBN 0750660007, 9780750660006.
14. Herbert Schneekluth, Volker Bertram Ship design for efficiency and economy. 2nd edition. Referex Engineering – Butterworth–Heinemann, 1998, 220 p., ISBN 0750641339, 9780750641333.
15. Taylor D.A., Tang Alan, Shung–tse Alan Merchant ship naval architecture – Institute of Marine Engi-neers, 2006. 216 p. (\*), ISBN 1902536568, 9781902536569.
16. Von Bertalanffy Ludwig General System theory: Foundations, Development, Applications – NY: George Braziller, revised edition 1976, ISBN 0–8076–0453–4.

УДК 629.124.9.039.001.63

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО СОЗДАНИЮ МОРЕХОДНОГО ВЕЗДЕХОДА НА ВОЗДУХООПОРНЫХ ГУСЕНИЦАХ ПОВЫШЕННОЙ ГРУЗОПОДЪЁМНОСТИ

**Анатолий Иванович Азовцев**

доктор технических наук, профессор  
начальник кафедры Теории и устройства судна  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а  
е –mail: Azovtsev@msun.ru

**Сергей Алексеевич Огай**

доктор технических наук, доцент  
ректор  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: (423) 241–49–68; e-mail: ogay@msun.ru

**Олег Владимирович Москаленко**

начальник отдела  
учёта и расследования транспортных происшествий  
Дальневосточное управление государственного морского надзора  
Федеральная служба по надзору в сфере транспорта  
690003, Владивосток, ул. Нижнепортовая, 3  
е –mail: Moskalenko-ov@dvgosmornadzor.ru

### Аннотация

Эффективность комплексного освоения обширного необорудованного побережья Арктики и Дальнего Востока России в значительной степени определяется транспортным и транспортно-технологическим обеспечением создания и функционирования баз освоения природных ресурсов и оборонительного комплекса. Амфибийный скоростной транспорт на новом принципе движения – на воздухоопорных гусеницах способен обеспечить решение множества задач круглогодично в широком диапазоне неблагоприятностей погоды. Сверхпогодозависимость авиации в этом регионе повышает значимость применения мореходных вездеходов. Применительно к условиям региона предлагался типоразмерный ряд транспортных средств на воздухоопорных гусеницах (ТСВГ) грузоподъемностью от 10 до 60 тонн [1]. Специалисты ТОФ для расширения базирования на островных территориях определили рациональным применение ТСВГ грузоподъемностью 100 тонн («Армия-2016»), техническое предложение по разработке которых им передано [2]. На базе проектов, изложенных в [1,2] выполнена «Разработка Технического предложения и формирование облика мореходного транспортного средства на воздухоопорных гусеницах грузоподъемностью 150 тонн» со значительным повышением габаритов перевозимых грузов [3]. Такая грузоподъемность и габариты перевозимых грузов при сходной компоновке вездеходов совпадают с проектом десантного корабля, разрабатываемого США. Энергозатраты для предлагаемого вездехода в глиссирующем режиме значительно меньше таковых для судов на воздушной подушке сходных водоизмещений и скорости хода. Прогнозируемые преимущества ТСВГ получили международную оценку, но санкции лишили возможности создания ТСВГ совместно с Канадой.

**Ключевые слова:** проектирование, мореходные вездеходы, прогнозирование мощности, воздухоопорная гусеница

## ENGINEERING SUGGESTION FOR CREATION OF SEAWORTHY ALL-TERRAIN VEHICLES OF INCREASED CARRYING CAPACITY ON AIR-SUPPORTED TRACKS

**Anatoliy I. Azovtsev**

Professor, Dr. Sci. Tech.  
Director of Ship theory and structure department  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: (423) 241–49–68; e-mail: Azovtsev@msun.ru

**Sergei A. Ogai**

Associate professor, Dr. Sci. Tech.  
Rector  
Maritime state university named Admiral Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: (423) 241–49–68; e-mail: ogay@msun.ru

**Oleg V. Moskalenko**

Director of the Department of control and investigation of traffic accidents  
Far East Directorate for State of Maritime Supervision  
Federal Service for Supervision in the Sphere of Transport  
3, Nizhneportovaya St., Vladivostok, 690003, Russia  
e –mail: Moskalenko-ov@dvgosmornadzor.ru

**Abstract**

The effectiveness of complex development of the vast unequipped Russian Arctic and Far Eastern coast lines is considerably defined by transport and transport-technological providing of creation and functioning of bases for development of natural resources and for defense complex. Amphibian high-speed transport using a new principle of motion – on air-supported tracks – is capable to provide the decision of many tasks all year round during many kinds of unfavorable weather. Super weather dependence of aviation in the region increases the meaning of application of seaworthy all-terrain vehicles. Considering the region conditions the authors suggest a type-sized number of transport facilities on air-supported tracks (FA-ST) of 10 to 60 tons carrying capacity. The Pacific Ocean Navy specialists considered the using of the FA-ST 100 ton capacity (Armiya-2016) as rational for expansion of disposition on the island territories. Engineering suggestions for developing those facilities have been handed over to the specialists. The technical suggestion and forming of the appearance of a seaworthy transport facility on air-supported tracks of 150 ton capacity with a considerable increase of overall dimensions of carried cargoes was made on the base of those developments. Such capacity and overall dimensions of carried cargoes with similar arranging coincide with the design of landing craft developed by the USA. Power inputs for the suggested all-terrain vehicles in a speed-boat regime are considerably lower than those of air-cushioned ships of similar displacement and speed. The forecast advantages of the FA-ST received the international assessment, but the sanctions deprived them of the possibility to be created jointly with Canada.

**Key words:** designing, all-terrain vehicles, forecasting the efficiency, air-cushioned track

**Введение**

Амбициозные планы России по интенсивному комплексному освоению Арктики и Дальнего Востока определяют необходимость экономичного амфибийного транспорта. Многолетние исследования МГУ им. адм. Г.И. Невельского доказали явные преимущества мореходных вездеходов на новом принципе движения – на воздухоопорных гусеницах [4]. Крупномасштабным экспериментом показана уникальная универсальность ТСВГ. На воде реализуется эффективнейший способ снижения сопротивления воды – движение обшивки судна по направлению набегающего потока. Большие объёмные гусеницы поднимают корпус над водой и при взаимодействии с потоком создают упор для преодоления волнового и аэродинамического сопротивлений. На суше КПД воздухоопорных гусениц в полтора раза выше, чем у винтов судов на воздушной подушке.

Прогнозируемые преимущества нашли отражение в множестве публикаций и технических предложений типоразмерного ряда с обоснованием рационального выполнения выполнения транспортных задач при освоении Арктики и Дальнего Востока. Потенциальные потребители наращивали требования по преодолению препятствий, по грузоподъёмности, по скорости хода. Наши разработки удовлетворяют самым высоким требованиям и «Техническое предложение по ТСВГ-150», освещаемое в настоящей статье подтверждает успех исследований и готовность к продолжению работ по реализации выявленных преимуществ.

**1. Типоразмерный ряд ТСВГ для комплексного освоения шельфа и побережья Арктики и Дальнего Востока**

Обширнейшие территории бездорожья Арктики и Дальнего Востока и акватории замерзающего шельфа и уникальная универсальность разрабатываемых ТСВГ стали основой для типоразмерного ряда мореходных вездеходов [1].

Базовый вариант разрабатывался преимущественно для разгрузки судов на необорудованный берег. Его грузоподъёмность 60.0 тонн обоснована рациональным завозом трех двадцатифутовых контейнеров. На транспортных и транспортно-технологических операциях предполагается его эффективное использование при обслуживании и строительстве нефте-газопроводов, строительстве и обслуживании баз освоения месторождений, обслуживания буровых платформ на шельфе и разведочных и добывающих комплексов работающих под водой и подо льдом, преодоление уклонов до 20°. Для защиты промыслов расширяется базирование силовых структур в Арктике, деятельность которых нуждается в эффективном скоростном амфибийном транспорте. Спасательные операции на трассе Северного морского пути, на шельфе, в том числе и в прибойной полосе, в тундре возможно выполнять круглогодично в широком диапазоне неблагоприятностей погоды. Ещё раз подчеркнем, что сверхпогодозависимость авиации в Арктике значительно повышает эффективность спасательных работ применением мореходных вездеходов. На крупномасштабной самоходной модели в масштабе 1:4 подтверждены преимущества и эффективность этого базового образца разработанного типоразмерного ряда ТСВГ.

Преимущественно для обеспечения прибрежного промысла выполнена разработка технического предложения и облика промыслового мореходного вездехода грузоподъемностью 20,0 тонн. Основное преимущество этого варианта ТСВГ проявляется при создании и функционировании на открытом побережье баз прибрежного промысла рыбы и морепродуктов, создании и обслуживании плантаций марикультуры, при сборе штормовых выбросов. Разработка выполнена по Федеральной целевой программе «Развитие гражданской морской техники» на 2009-2016 годы. Обоснована возможность увеличения в 20 раз продукции прибрежного промысла и марикультуры при использовании свежайшего экологически чистого сырья при малых транспортных затратах и малой доле в себестоимости инфраструктурных затрат при круглогодичной эксплуатации беспричалных баз на открытом побережье [5]. ТСВГ при грузоподъемности 20,0 тонн способен с некоторыми ограничениями выполнять весь набор функций базового вездехода грузоподъемностью 60,0 тонн.

Многими руководящими документами по освоению Севера и Арктики предусматривается обеспечение естественной регулярной транспортной доступности для малочисленного коренного населения распределенного по обширнейшим бездорожным территориям тундры и лесотундры. ТСВГ грузоподъемностью 10,0 тонн разрабатывался для широкого использования как грузопассажирского, медицинского, спасательного, пожарного. Концептуально обоснована возрастающая потребность в свежих продуктах питания населения занятого на предприятиях разведки и добычи углеводородов, на базах силовых структур, что может быть рационально выполнено расширением традиционных видов промысла коренного населения. Регулярный вывоз свежей оленины и рыбы вездеходами обеспечит регулярную транспортную доступность коренному населению.

Для описанного выше типоразмерного ряда по ФЦП «Развитие гражданской морской техники» 2009-2016 годы выполнены «Разработка концептуальных проектов плавсредств — мореходных вездеходов на воздухоопорных гусеницах для прибрежного промысла», госконтракт №9411.1007400.09.083 и «Разработка технических предложений и формирование облика мореходных транспортных средств на воздухоопорных гусеницах для комплексного освоения побережья и замерзающего шельфа», контракт №10411.1007400.09.053.

## **2. Потребность в амфибийном транспорте большой грузоподъемности**

Мировой транспортный флот надежно повышает свою эффективность увеличением размеров судов. Это значительно снижает затраты энергии на единицу перевозимого груза, что присуще и для плавающих вездеходов. Для мореходных вездеходов увеличение размерений более значимым воспринимается эффект увеличения габаритов перевозимой техники, оборудования. Для многих видов работ при пионерном освоении территорий возможность перевозки высокогабаритных грузов становится базовым требованием к амфибийному транспорту.

Тихоокеанский флот наращивает темпы освоения Курильских островов и побережья Дальнего Востока. Заинтересованный обмен мнениями на Международном военно-техническом форуме «Армия-2015» через год на форуме «Армия-2016» завершился конкретизацией требований ТОФ к мореходному вездеходу: грузоподъемность 100,0 тонн; возможность перевозки любой техники, оборудования и грузов, которые могут перевозиться по железной дороге; возможность перевозки вездехода на дальние расстояния на палубе специализированных судов; возможность завоза грузов на расстояние до 1000 км.

В соответствии со стандартом на Техническое предложение в МГУ им. адм. Г.И. Невельского выполнена «Разработка технического предложения и формирование облика мореходного транспортного средства на воздухоопорных гусеницах грузоподъемностью 100 тонн» [2]. При водоизмещении 140 тонн длина вездехода 19,20 м, длина грузовой платформы между гусеницами 13,30 м, ширина грузовой платформы 3,20 м, ширина вездехода 10,2 м, мощность ходовых двигателей 1270 кВт, что значительно меньше чем это необходимо для амфибийных судов на воздушной подушке при сходном водоизмещении и скорости хода. В 2017 году разработка передана командованию ТОФ.

Удовлетворение требований ТОФ при разработке ТСВГ-100 рационально расширяет перечень провозных способностей базового варианта ТСВГ-60 и обосновывает интерес к повышению провозных способностей с увеличением грузоподъемности и габаритов перевозимых грузов и подтверждает потребность в вездеходах большой грузоподъемности.

Потенциальный заказчик мореходных вездеходов большой грузоподъемности ориентируется на увеличение грузоподъемности в предположении возможной большой вывоза стандартных контейнеров. Определить предельную грузоподъемность для универсального амфибийного вездехода довольно сложно. Сложившаяся практика разработки ТСВГ базируется на ограничениях нагрузки на переувлажненный грунт тундры летом. Эти ограничения [6] основаны на исследованиях давления на грунт колесных и гусеничных двигателей, площадь опирания которых многократно меньше чем это принято в технических предложениях по ТСВГ. Особенности деформирования переувлажненного грунта при больших скоростях хода дают основание предполагать, что дернина не будет разрушаться при больших площадях опирания и высокой скорости хода при давлениях больших предельных для колесных и гусеничных вездеходов с обычными гусеницами [6].

При движении на замерзшем грунте ограничения трудно обосновать. Косвенно примером ограничения на твердом грунте могут служить предельные значения грузоподъемности самосвалов. В режиме движения по воде предел допустимой грузоподъемности можно заимствовать из опыта эксплуатации судов на воздушной подушке. Косвенные ориентиры по условию на твердом грунте и воде предполагают границу грузоподъемности в 250-300 тонн. При отсутствии опыта эксплуатации



разработка вездеходов столь высокой грузоподъемности представляется преждевременной.

### 3. Проект гусеничной амфибии грузоподъемностью более 100,0 тонн

Принципиальные схемы транспортных средств на воздухоопорных гусеницах могут значительно отличаться положением корпуса относительно поверхности воды на малых скоростях хода и при глиссировании. Базовой особенностью представленных в пункте 1 технических предложений корпус вездехода поднят над поверхностью воды. Плавучесть погруженной части воздухоопорной гусеницы принята равной опорной реакции на грунт.

Активно развиваются амфибийные транспортные средства для высадки морских десантов. Во многих армиях мира применяются разнообразные суда на воздушной подушке, отличающиеся высокой скоростью и грузоподъемностью. Большие энергозатраты на движение определяют большой объем потребляемого топлива. Исключить этот недостаток планируется в США [7].

Исследовательское подразделение Корпуса морской пехоты (КМП) с 2008 года ведет поиск замены судам на воздушной подушке. Одним из возможных решений является опытный транспорт УНАС (Ultra Heavy-Lift Amphibious Connector). Работы над созданием первого опытного образца были начаты в 2012 году, а первые его испытания начались в июле 2014 года.

Опытный образец необычного судна-амфибии на гусеничном ходу уже сейчас поражает своими размерами, при том, что речь пока идет лишь о масштабной копии, которая в 2 раза меньше планируемой серийной модели. Опытный образец имеет в длину 12,8 метра, в ширину — 8 метров, высота десантного транспорта УНАС — 5,2 метра. В окончательной версии длина 25,4 м, ширина 16,0 м, высота 10,4 м. Новый десантный корабль-амфибия сможет взять на борт до 150 тонн груза или 3 танка M1 Abrams.

Новое десантное транспортное средство УНАС благодаря наличию гусеничной базы сможет продолжить движение и по суше, при этом машина сможет преодолевать препятствия высотой до 3-х метров. Десантное судно-амфибия УНАС использует не воздушную подушку, а специальные гусеничные траки из застывшей пены, накаченные воздухом. Данное решение позволяет амфибии легко перемещаться даже по самой труднопроходимой местности и десантироваться практически на любые

участки побережья. УНАС без проблем преодолевает участки с илистым грунтом или болота. Транспортер легко преодолевает заболоченные участки дна, открывшиеся после отлива, а также любые грязевые «ванны» на своем пути. Расплатой за использование гусениц стало снижение динамики перемещения. По воде такой транспорт может двигаться с максимальной скоростью в 20 узлов (Рис. 1.).



Рис. 1. Опытный транспорт УНАС

Крупномасштабный успешный эксперимент по проверке работоспособности УНАС даёт основание предположить допустимым создание гусеничного вездехода грузоподъемностью 150,0 тонн. В названии этого вездехода США подчеркнута его сверхвысокая грузоподъемность. Именно ее приняли за предел грузоподъемности в разработках ТСВГ большой грузоподъемности.

### 4. Техническое предложение по созданию мореходного вездехода ТСВГ-150

В соответствии с ГОСТ 2.118-73 «Техническое предложение» сравниваем варианты обоснованы рациональные тактико-технические данные мореходного вездехода грузоподъемностью 100,0 тонн [2]. Опыт разработки типоразмерного ряда (пункт 1) стал основой для принятия схемы ТСВГ-60, проверенной в крупномасштабном эксперименте, в качестве прототипа для разработки схемы ТСВГ-100.

Облик предлагаемого к разработке ТСВГ-150 при грузоподъемности (дедвейте) 150,0 тонн во многом сходен с обликом ТСВГ-100 [2]. Основные элементы ТСВГ-150 грузоподъемностью 150 т приведены в Таблице 1.

Таблица 1

**Элементы и характеристики мореходного вездехода на воздухоопорных гусеницах грузоподъемностью 150,0 тонн на этапе разработки технического предложения**

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	ТСВГ-150					
1.	Предпроектное водоизмещение	$\Delta$	т	254,0	13.	Скорость хода на воде	$V_{Гл}$	уз	23,3
2.	Базовый дедвейт	$DW$	т	150,0	14.	Скорость хода на грунте	$V_{ГР}$	км/ч	70,0
3.	Водоизмещение порожнем	$\Delta_{п}$	т	104,0	15.	Избыточное давление в воздушной подушке	$P_{и}$	кПа	31,15
4.	Габаритная длина транспортного средства	$L_{нб}$	м	24,2	16.	Клиренс полоза	$K_{люл}$	м	0,6
5.	Габаритная ширина транспортного средства	$B$	м	11,28	17.	Высота воздушной подушки	$H_{вп}$	м	0,75
6.	Высота габаритная	$H$	м	6,9	18.	Межосное расстояние барабанов	$L$	м	20,15
7.	Длина грузовой платформы	–	м	13,3	19.	Диаметр приводных барабанов	$D_{б}$	м	1,4
8.	Ширина грузовой платформы	–	м	3,7	20.	Длина понтона внутригусенич.	$L_{пвг}$	м	18,35
9.	Высота ограждений грузовой площадки	–	м	3,7	21.	Высота внутригусенич. понтона	$H_{пвг}$	м	1,6
10.	Мощность ходовых двигателей	$N_{х}$	кВт	2000,0	22.	Диаметр пневмоплиц	$D_{п}$	м	1,25
11.	Мощность двигателей воздухоподдержания	$N_{воз}$	кВт	200,0	23.	Длина гусеничной ленты	$L_{г}$	м	46,25
12.	Мореходность		баллы	5,0	24.	Ширина гусеничной ленты	$B_{л}$	м	3,05
					25.	Число плиц на одной гусенице	$n_{п}$	шт	37
					26.	Ширина скегов центральных	–	м	0,4
					27.	Ширина скегов бортовых	–	м	0,34

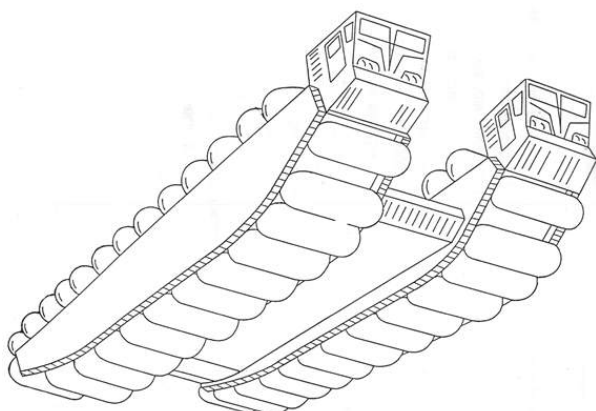


Рис. 2. Облик ТСВГ-150

В разработках ТСВГ-100 рациональное снижение размерений достигнуто повышением давления в воздушной подушке воздухоопорных гусеницах и в пневмоплицах на их внешней поверхности. Проверена возможность обеспечить грузоподъемность 150,0 тонн при сохранении размерений ТСВГ-100 при форсировании системы поддержания давления в нижней полости гусеницы и, соответственно, в пневмоплицах. Получены основные тактико-технические данные при обеспечении повышенной грузоподъемности, но при сохранении габаритных ограничений принятых для ТСВГ-100, что признано недостатком

рассмотренного варианта и стало основой для совершенствования схемы вездехода.

Повышение габаритов перевозимых грузов проверено масштабным пересчетом геометрических параметров ТСВГ-100 на основе кубической зависимости дедвейта от масштаба.

Пересчет выявил излишне высокие габариты вездехода и рациональное увеличение габаритов перевозимых грузов. Имея информацию о малых габаритах за счет повышения давления воздуха в воздушной подушке гусеницы, решение получили отдав предпочтение большим габаритам грузовой площадки и снижением размерений воздухоопорной гусеницы повышением давления воздуха в ней.

**Заключение**

Высокая оценка перспективности применения мореходных вездеходов на воздухоопорных гусеницах в Арктике и на Дальнем Востоке (План мероприятий Рабочей группы по Арктике и Северу Российско-Канадской межправительственной комиссии от 31.01.2014г., Оттава, Канада) подтверждена разработкой технического предложения по созданию вездехода повышенной грузоподъемности достигающей 150 тонн. Размерения транспортного средства гарантируют возможность перевозки контейнеров в два яруса, длинномеров, габаритных конструкций и техники. Высокие скорости хода достигаются при энергозатратах значительно меньших, чем для амфибийных судов на воздушной подушке за счет движения смоченной поверхности (гусениц) по

направлению набегающего потока и подъема корпуса вездехода над водой. Уникальная универсальность ходовых качеств в широком диапазоне неблагоприятностей погоды в Арктике круглый год и энергетическая эффективность дают основание высокой конкурентоспособности на внутреннем и международном рынках. Необходимо своевременное продолжение разработки ТСВГ как

транспортного средства двойного назначения. Это позволит России сохранить лидирующие позиции в освоении нового принципа движения — на воздухоопорных гусеницах, обеспечит эффективное предоставление транспортных услуг через необорудованный берег.

#### Литература

1. Азовцев А.И., Огай С.А., Москаленко О.В. Разработка типоразмерного ряда мореходных вездеходов на воздухоопорных гусеницах для комплексного освоения побережья и замерзающего шельфа // «Морские интеллектуальные технологии». Спецвыпуск №1.2013.С.34-37.
2. Пояснительная записка по опытно-конструкторской работе. Разработка технического предложения и формирование облика мореходного средства на воздухоопорных гусеницах грузоподъемностью 100 тонн. ГBT №1.23/7-2017, руководитель А.И. Азовцев. МГУ им.адм. Г.И. Невельского. Владивосток, 2017-85с.
3. Пояснительная записка по опытно-конструкторской работе. Разработка технического предложения и формирование облика мореходного транспортного средства на воздухоопорных гусеницах грузоподъемностью 150 тонн. МГУ 8-1/7-33 от 27.08.2018 руководитель А.И. Азовцев. МГУ им.адм. Г.И. Невельского, Владивосток, 2018-104с.
4. Азовцев А.И., Огай С.А., Москаленко О.В. Прогноз преимуществ транспортных средств на воздухоопорных гусеницах для комплексного освоения замерзающего шельфа Арктики и Дальнего Востока // Материалы 12-ой международной научно-практической конференции: Проблемы транспорта Дальнего Востока. Владивосток. – МГУ. – 2017.
5. Азовцев А.И., Карпушин И.С., Москаленко О.В. Мореходные вездеходы на воздухоопорных гусеницах для повышения эффективности освоения биоресурсов с баз на открытом побережье // Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов мирового океана. Материалы V Международной научно-технической конференции. Часть 1, Дальрыбвтуз, Владивосток, 2018. С.5-6.
6. Чеботаев А.А., Мельник А.Д. Безвредные транспортные средства для Севера // Научно-технический прогресс и перспективы развития новых специализированных видов транспорта. Сб.мат-ов Всесоюзной научно-практической конференции: 23-26 октября 1990г. С.115-125.
7. Опытный транспорт УНАС (США) – URL: <http://rufor.org/showthread.php?t=23031>.

#### References

1. Azovtsev A.I., Ogay S.A., Moskalenko O.V. Razrabotka tiporazmernogo ryada morekhodnykh vezdekhodov na vozdukhoopornykh gusenitsakh dlya kompleksnogo osvoeniya poberezh'ya i zamerzayushchego shel'fa // «Morskie intellektual'nye tekhnologii». Spetsvypusk №1.2013.S.34-37.
2. Poyasnitel'naya zapiska po opytno-konstruktorskoj rabote. Razrabotka tekhnicheskogo predlozheniya i formirovanie oblika morekhodnogo sredstva na vozdukhoopornykh gusenitsakh gruzopod'emnost'yu 100 tonn. GBT №1.23/7-2017, rukovoditel' A.I. Azovtsev. MGU im.adm. G.I. Nevel'skogo. Vladivostok, 2017-85s.
3. Poyasnitel'naya zapiska po opytno-konstruktorskoj rabote. Razrabotka tekhnicheskogo predlozheniya i formirovanie oblika morekhodnogo transportnogo sredstva na vozdukhoopornykh gusenitsakh gruzopod'emnost'yu 150 tonn. MGU 8-1/7-33 ot 27.08.2018 rukovoditel' A.I. Azovtsev. MGU im.adm. G.I. Nevel'skogo, Vladivostok, 2018-104s.
4. Azovtsev A.I., Ogay S.A., Moskalenko O.V. Prognoz preimushchestv transportnykh sredstv na vozdukho-opornykh gusenitsakh dlya kompleksnogo osvoeniya zamerzayushchego shel'fa Arktiki i Dal'nego Vostoka // Materialy 12-oy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Vladivostok. – MGU. – 2017.
5. Azovtsev A.I., Karpushin I.S., Moskalenko O.V. Morekhodnye vezdekhody na vozdukhoopornykh gusenitsakh dlya povysheniya effektivnosti osvoeniya bioresurov s baz na otkrytom poberezh'e // Aktual'nye problemy osvoeniya biologicheskikh resurov mirovogo okeana. Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Chast' 1, Dal'rybvtuz, Vladivostok, 2018. S.5-6.
6. Chebotaev A.A., Mel'nik A.D. Bezvrednye transportnye sredstva dlya Severa // Nauchno-tekhnicheskij progress i perspektivy razvitiya novykh spetsializirovannykh vidov transporta. Sb.mat-ov Vsesoyuznoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: 23-26 oktyabrya 1990g. S.115-125.7.
7. Opytnyy transport UShA (SShA) – URL: <http://rufor.org/showthread.php?t=23031>.

УДК 629.12.001.24:681.32

## СУПЕРПОЗИЦИЯ И ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ ПРОЕКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЦЕЛЕВОГО СУДНА ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ИХ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ

**Сергей Алексеевич Огай**

доктор технических наук, доцент

ректор

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а

тел.: (423) 241–49–68; e-mail: ogay@msun.ru

**Михаил Владиленович Войлошников**

доктор технических наук, профессор

главный научный сотрудник

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а

тел.: 8-914-705-6029; e-mail: michael.vladlen@gmail.com

### Аннотация

Характеристики размера многоцелевого судна ледового плавания, такие как проектный дедвейт, водоизмещение, регистровая вместимость, провозоспособность и др. не всегда являются независимыми в системном отношении и некоторые из найденных характеристик размера судна предопределяют остальные в соответствующем приближении. Определение оптимальных характеристик и проектных элементов многоцелевого судна ледового плавания выполняется в последовательности: первоначально находятся оптимальные характеристики судна в рамках проектных ограничений и затем определяются элементы проектируемого судна (размерения судна, их соотношения и другие элементы), при этом проектными ограничениями выступают найденные характеристики судна. При выборе независимой характеристики судна которая в дальнейшем варьируется при поиске ее оптимального значения по применяемому критерию, учитывается системное методологическое свойство суперпозиции проектных характеристик, заключающееся в том, что при поиске оптимальных значений независимые оптимальные характеристики судна связаны балансовыми соотношениями с остальными характеристиками размера судна и связаны параметрическими зависимостями с проектными элементами судна.

**Ключевые слова:** многофункциональный ледокол, проектная оптимизация, критерий оптимальности, целевая функция, проектное ограничение, характеристики судна, элементы судна

## THE SUPERPOSITION AND INTERCHANGEABILITY OF DESIGN CHARACTERISTICS OF MULTIPURPOSE ICE-NAVIGATION SHIP IN DETERMINING OF THEIR OPTIMUM VALUES

**Sergei A. Ogai**

Associate professor, Dr. Sci. Tech.

Rector

Maritime state university named Admiral Nevelskoi

50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia

tel.: (423) 241–49–68; e-mail: ogay@msun.ru

**Michael V. Voyloshnikov**

Professor, Dr. Sci. Tech.

Chief research scientist

Maritime state university named Admiral Nevelskoi

50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia

tel.: 8-914-705-6029; e-mail: michael.vladlen@gmail.com

### Abstract

The characteristics of size of the multipurpose ice-navigation ship, such as design deadweight, displacement, tonnage, carrying capacity, etc., do not appear to be independent in the system attitude, and any of the characteristics of the ship size found predetermines rest in the definite approximation. The determination of the optimal characteristics and the design particulars of multipurpose ice-navigation ship is carried out in the sequence: initially the characteristics of ship size are determined with the allowance of design constraints, and then the particulars are sought of the ship under design (ship dimensions and their proportions and other design particulars), while the design constraints are ship characteristics found. When selecting an independent characteristic of ship which is varied in the next for the search its optimal value on the criteria used, it is taken into account the methodological systemic property of superposition of design characteristics as to find the optimal values of the independent design characteristics of ship the associated balance proportions with the rest of the characteristics of ship size and the associated

parametric dependences with the design particulars of the ship, that means as well the determining in the initial approximation of the rest characteristics of ship size and design particulars of ship.

**Key words:** multifunctional icebreaker, design optimization, optimality criterion, objective function, design constraint, characteristics of ship, ship particulars

### Введение

Взаимозаменяемость выступает методологическим свойством величин различных типов в составе математической модели, применяемой для определения оптимальных значений характеристик и элементов при проектировании многоцелевого судна ледового плавания. Взаимозаменяемость характеристик и элементов означает взаимосвязь между характеристиками и взаимосвязь между проектными элементами судна, которые. Эта взаимозависимость на начальных этапах проектирования осуществляется в форме уравнений баланса между характеристиками судна и в форме параметрических зависимостей между этими характеристиками и проектными элементами, или соотношениями этих элементов.

При определении оптимальных характеристик на начальных этапах проектирования многоцелевого судна ледового плавания в рамках методологического системного подхода требуется учитывать свойство суперпозиции характеристик и проектных элементов судна, связанное с возможностями независимого нахождения характеристик и элементов последовательно на разных этапах, или независимого определения характеристик судна и их приращений. А на каждом отдельном этапе проектирования величины этих типов можно было бы считать независимыми ввиду несоразмерности их интервалов варьирования или имеющихся параметрических зависимостей между этими величинами рассматривать как замену поиска этих величин по используемому критерию.

Когда в качестве варьируемых искомым величин используется та или иная характеристика размера проектируемого судна ледового плавания, то остальные характеристики размера судна, например из числа: водоизмещение по грузовой марке  $D$ , проектный дедвейт  $DW$ , грузоподъемность  $PG$ , валовая и чистая регистровые вместимости  $GRT$ ,  $NRT$  и др., как правило, находятся с выбранной характеристикой в балансовых соотношениях. Иными словами, возможные интервалы их варьирования существенно уже, чем интервал значений, в котором может варьироваться выбранная из этой совокупности независимая характеристика размера, в качестве которой для многоцелевого судна ледового плавания можно рекомендовать использовать характеристику проектного дедвейта.

Интервалы изменчивости (варьирования) остальных характеристик многоцелевого судна ледового плавания, связанных с выбранной независимой балансовыми соотношениями, и интервалы изменчивости его проектных элементов, то есть характеристик подсистем судна, соразмерны погрешностям этих балансовых соотношений, используемых в составе ограничений на начальных этапах проектирования судна, и соразмерны погрешностям параметрических зависимостей, которыми проектные элементы связаны на этих

этапах проектирования с характеристиками судна, варьируемыми при поиске их оптимальных значений.

При определении оптимальных проектных характеристик судна нужен соответствующий запас размера судна, в частности проектный запас водоизмещения, или запас проектного дедвейта, который на последующих этапах проектирования при нахождении проектных элементов и соответствующих им остальных характеристик судна мог бы использоваться для компенсации указанных уточнений размера судна, находящихся в зависимости от уточняемых проектных элементов с учетом того, что проектные элементы многоцелевого судна ледового плавания при нахождении его оптимальных проектных характеристик определяются в зависимости от этих характеристик, а в дальнейшем уточняются (на последующих стадиях проектирования, когда объектом выступают подсистемы судна), при этом интервалы варьирования при определении проектных элементов соразмерны с погрешностью использованных параметрических формул, и с учетом того, что обобщенные переменные характеристики судна определяются по балансовым соотношениям в зависимости от искомым на предмет оптимальности независимых характеристик судна, а на последующих стадиях проектирования при нахождении элементов, служащих характеристиками подсистем судна, обобщенные переменные характеристики судна уточняются на последующих стадиях проектирования, и интервалы их варьирования, при этом, соразмерны погрешностям использованных балансовых соотношений.

Нужно отметить, что, несмотря на многообразие проектных элементов многоцелевого судна ледового плавания, определяемых на последующих этапах как характеристики его подсистем, не требуется чрезмерный проектный запас размера судна, например водоизмещения, дедвейта или иной характеристики размера, используемой в качестве искомой независимой переменной на начальных стадиях проектирования, поскольку влияние на размер судна со стороны каждого из проектных элементов, уточняемых в соответствующих интервалах варьирования на последующих этапах, можно вероятностно охарактеризовать как факторы, влияющие на увеличение или уменьшение размера проектируемого судна.

Таким образом, совокупное влияние проектных элементов, уточняемых на последующих этапах, на оптимальный размер проектируемого многоцелевого судна ледового плавания по относительной величине меньше в общем случае, чем влияние на размер судна каждого отдельного из проектных элементов, определяемых в порядке их уточнения. Поэтому проектный запас размера многоцелевого судна ледового плавания, например запас водоизмещения, дедвейта или иной характеристики размера, искомой как независимая на начальных этапах проектирования судна, может на начальном этапе проектирования выступать как небольшая по относительной величине положительная экспертная



поправка к искомой характеристике размера судна, находящаяся в линейной пропорциональной зависимости к этой характеристике размера, в частности как слагаемое уравнения баланса водоизмещения, зависящее в первой степени от водоизмещения (или от проектного дедвейта).

В представленном примере суперпозиция, то есть, возможность независимого нахождения проектной характеристики судна и его остальных характеристик и проектных элементов, возникает как системное свойство ввиду несоразмерности интервалов изменчивости этих характеристик и проектных элементов, определяемых независимо, поскольку независимая проектная характеристика судна при нахождении ее оптимального значения на начальном этапе проектирования варьируется в интервале, соразмерном с ее собственной величиной, а остальные характеристики и проектные элементы определяются на дальнейших этапах проектирования в существенно меньших интервалах, соразмерных погрешностям балансовых соотношений между характеристиками судна и погрешностям параметрических зависимостей между характеристиками и проектными элементами.

**1. Суперпозиция факторов полезной нагрузки и водоизмещения**

Можно привести другой пример использования системного свойства суперпозиции при нахождении проектных характеристик, связанный с решением уравнения баланса водоизмещения многоцелевого судна ледового плавания. Водоизмещение судна этого типа можно рассматривать зависимым от заданного проектного дедвейта  $D(DW)$  и от приращения водоизмещения  $\Delta D_{P(h)}$  вследствие неявного заданного приращения нагрузки  $\Delta P(h)$ , зависящего, в данном случае, от заданного проектного ограничения по наибольшей толщине сплошного форсируемого льда  $h$ , то есть в общем случае от предписываемых по техническому заданию эксплуатационных качеств судна во льдах или от заданной ледовой категории (арктической, полярной, ледокольной и др.).

Суперпозиция, то есть методологическая возможность независимого приближенного определения указанных компонентов водоизмещения, тоже связанная с несоразмерностью интервалов варьирования проектного дедвейта и приращения водоизмещения многоцелевого судна ледового плавания в результате неявного заданного приращения нагрузки, следует из способа определения его водоизмещения как суммы указанных слагаемых с использованием в конечном виде или в дифференциальной форме уравнения баланса водоизмещения.

Иными словами, при определении водоизмещения  $D$  многоцелевого судна ледового плавания на этапе его проектирования с учетом двух названных групп данных, оказывающих влияние разного порядка на результирующий показатель, можно придерживаться принципа суперпозиции влияния этих групп данных и находить последовательно оба слагаемых в дифференциальном уравнении баланса водоизмещения

$$D(DW, h) = D(DW) + dD_{P(h)}. \tag{1}$$

Можно рекомендовать учитывать влияние ледокольной функции в форме приращения водоизмещения  $dD_p$  с использованием уравнения баланса водоизмещения судна в форме приращений (коэффициента Нормана, Рис. 1).

На этапе проектирования судна определение водоизмещения  $D$  в последовательности зависимостей математической модели производится с использованием уравнения баланса водоизмещения в конечном виде и в форме приращений в зависимости от исходных данных, другими словами, проектных ограничений, служащих характеристиками более общих систем, к которым судно относится как подсистема:

- от проектного дедвейта  $DW$ , включая не только наибольшую массу переменных грузов, но и массу всех систем, оборудования и устройств, заданных явно или неявно в составе проектных ограничений в соответствии с назначением судна, то есть суммарную нагрузку, входящую в нулевой степени зависимости от водоизмещения в уравнение баланса;

- от ледокольной функции, в частности характеризуемой толщиной  $h$  сплошного ледового поля, с предположением, что остальные критерии мореходности в условиях льда в той или иной мере зависят от способности судна двигаться в сплошном ледовом поле определенной толщины.

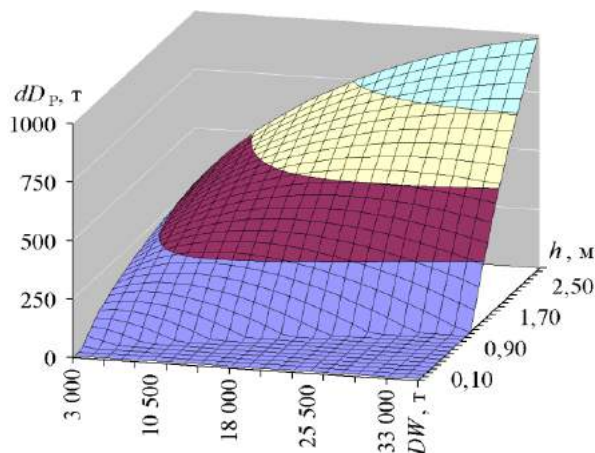


Рис. 1. Зависимость приращения водоизмещения  $dD_p$  от заданного проектного ограничения по толщине сплошного ледового поля  $h$  и от проектного дедвейта  $DW$  (а) для варианта уменьшенной шпации (при установке дополнительных шпангоутов на бортовом перекрытии в пределах воздействия льда)

**2. Взаимозаменяемость Показателей эффекта**

Функция полезности характеризует эффект многоцелевого судна ледового плавания и служит неотъемлемой частью экономического критерия, применяемого для нахождения оптимальных характеристик. Эффектом может быть как характеристика навигационного обслуживания в условиях льда судов, не имеющих ледовую категорию или имеющих несущественную ледовую



категорию, так и характеристика собственной транспортной или иной работы во льдах.

В качестве вариантов функции полезности, то есть зависимости показателя полезного эффекта от переменных и проектных ограничений – исходных данных и параметров может рассматриваться характеристика транспортной работы судна, то есть его провозоспособность, в том числе автономная провозоспособность в ледовых условиях, и характеристика размера многоцелевого судна ледового плавания, которая показывает способность судна служить для базирования оборудования и персонала и для оказания вспомогательных навигационных услуг в ледовых условиях, в том числе, способность прокладывать фарватеры в ледовых полях.

Функции критерия удельных приведенных затрат (без учета финансового ограничения инвестора в виде поправки к критерию) в расчете на единицу функции полезности, если в качестве нее рассматривается проектный дедвейт  $DW$

$$PW / DW = (C - CD + i \times RC) / DW . \quad (2)$$

показана в форме графической поверхности (Рис. 2, а).

В качестве альтернативного варианта характеристики эффекта  $E$  рассматривается использование показателя годовой провозоспособности  $Q_{CG}$  (Рис. 2, б)

$$PW / Q_G = (C - CD + i \times RC) / Q_G . \quad (3)$$

что было бы обычным показателем полезности транспортного судна, планируемого в серийную постройку.

Неоднородная гладкость поверхности целевой функции (Рис. 2, б), связанная с физическими предпосылками при определении зависимых показателей: эффективной мощности и скорости на открытой воде судов небольших ледовых категорий не оказывает существенного влияния на общий вывод о предпочтительности большего размера судна при оценке его эффективности в расчете на единицу перевозимого груза по удельным приведенным затратам ( $PW / Q_G$ ).

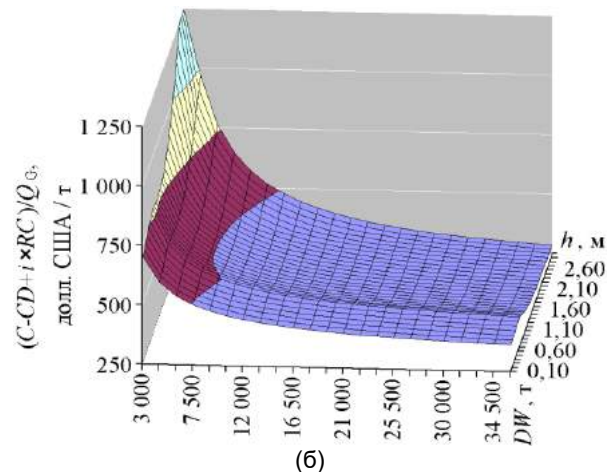
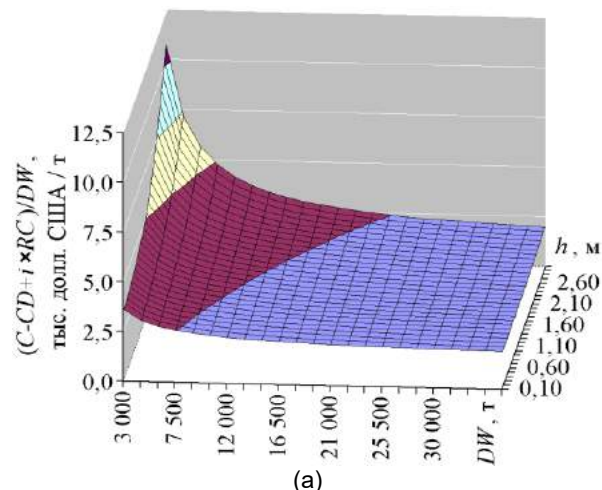


Рис. 2. Зависимости удельных приведенных затрат от проектного ограничения по толщине сплошного форсируемого льда  $h$  и от искомой переменной характеристики проектного дедвейта  $DW$ : (а) в расчете на единицу функции полезности  $PW / DW$ , в качестве которой рассматривается проектный дедвейт  $DW$ , (б)  $d$  в расчете на единицу провозоспособности судна  $PW / Q_{CG}$

Аналогичный вывод о предпочтительности судна наибольшего размера можно сделать по анализу графической поверхности целевой функции в форме удельных приведенных затрат  $PW / DW$  в расчете на единицу размера судна (проектного дедвейта. Рис. 2, а).

Замена одной функции полезности на другую (из двух рассмотренных вариантов  $Q_G$  и  $DW$ ) в знаменателе экономического критерия практически не может повлиять на положение оптимального экстремума целевой функции вдоль оси искомой характеристики размера судна.

Найдено, что размер многоцелевого судна ледового плавания приближенно находится в пропорциональной зависимости с показателем провозоспособности, и эти характеристики полезности (размер судна и его провозоспособность) в широком диапазоне данных могут быть взаимозаменяемыми в составе критерия при определении оптимальных проектных характеристик судна. В широком интервале варьирования размера судна его годовую провозоспособность  $Q_G$  для каждого заданного проектного ограничения по толщине сплошного форсируемого льда  $h$  можно на начальных этапах проектирования считать пропорциональной размеру судна (проектному дедвейту  $DW$  или иной характеристике размера).

### 3. Взаимозаменяемость проектных характеристик размера судна

Иные переменные характеристики размера многоцелевого судна ледового плавания, например, водоизмещение по грузовую марку  $D$ , грузоподъемность  $PG$  валовая регистровая вместимость  $GRT$  или чистая вместимость  $NRT$  и др., а также некоторые из тех, которые относят обычно к проектным элементам судна, то есть к

характеристикам его подсистем, могут использоваться в качестве переменной характеристики размера помимо проектного дедвейта судна  $DW$ . В частности, в качестве переменной характеристики размера может применяться расчетная длина судна  $L$ , обычно относимая к его проектным элементам.

Примеры использования иных характеристик размера судна в качестве варьируемой искомой характеристики на начальных этапах проектирования показаны на графических функциональных поверхностях целевой функции  $f$ , зависящей от проектного ограничения по наибольшей толщине форсируемого льда  $h$  и от искомой переменной, варьируемой при оптимизации, представленной характеристикой расчетной длины судна  $L$  (Рис. 3, а) или чистой регистровой вместимости  $NRT$  (Рис. 3, б).

Использование в качестве примеров искомых характеристик размера многоцелевого судна ледового плавания его расчетной длины  $L$  или чистой регистровой вместимости  $NRT$  означает отнесение дедвейта  $DW$  и остальных характеристик размера судна, в таких случаях, зависящих от длины судна или вместимости, к числу его проектных элементов, служащих параметрами, зависимыми от варьируемой искомой характеристики размера.

#### 4. Замена проектного ограничения характеристикой при нахождении скорости проектируемого судна

Характеристика эксплуатационной скорости  $v_s$  в паре с характеристикой размера судна, (например, с водоизмещением по грузовую марку  $D$ ) в общем приближении определяют эффективную мощность  $N_e$ , связанную с пропульсивной мощностью  $N_{св}$ , необходимой для форсирования льда, и в то же время обуславливают определенный уровень эксплуатационных качеств судна во льдах.

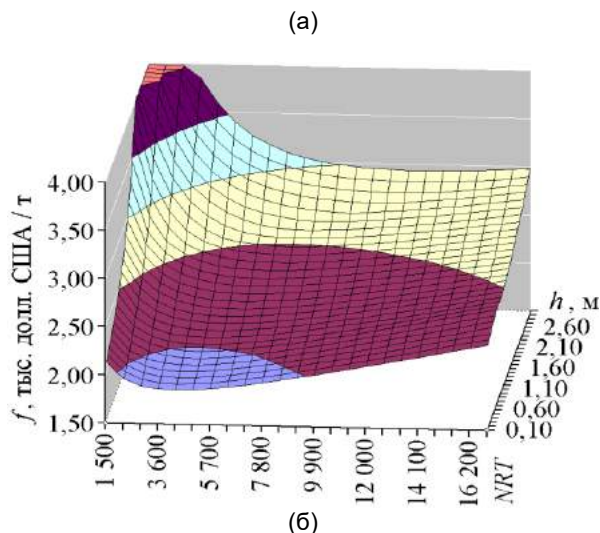
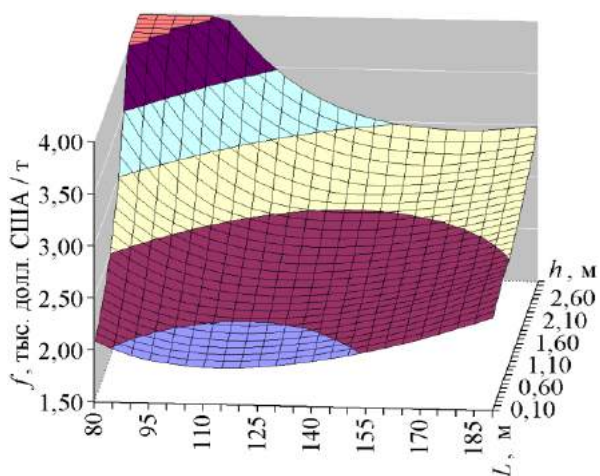


Рис. 3. Зависимости целевой функции  $f$  от проектного ограничения по наибольшей толщине форсируемого льда  $h$  и от искомой переменной характеристики, в варианте использования (а) – расчетной длины судна  $L$  или (б) – чистой регистровой вместимости  $NRT$

Это означает, что при несущественных ледовых категориях уровень эксплуатационных качеств судна во льдах можно найти в зависимости от эксплуатационной скорости  $v_s$  судна на открытой воде, используя эту эксплуатационную скорость в качестве искомой характеристики судна взамен предписываемого проектного ограничения ледовой категории проектируемого судна заданной толщиной  $h$  форсируемого ледового поля или связанный показатель.

Для нахождения оптимальных проектных характеристик при малозначительной ледовой категории судна можно было бы заменить используемое при нахождении целевой функции проектное ограничение по наибольшей толщине сплошного форсируемого льда  $h$  (или иную предписанную в задании характеристику эксплуатационных качеств судна во льдах), служащее, в то же время проектной характеристикой судна, на искомую переменную характеристику эксплуатационной скорости  $v_s$  судна на открытой воде.

На графических функциональных поверхностях представлены: пример зависимости целевой функции  $f$  от водоизмещения по грузовую марку  $D$  (от массы снаряженного судна с грузом, Рис. 4, а) и зависимости эксплуатационной скорости судна в открытой воде  $v_s$  (спецификационного значения скорости судна, Рис. 4, б).

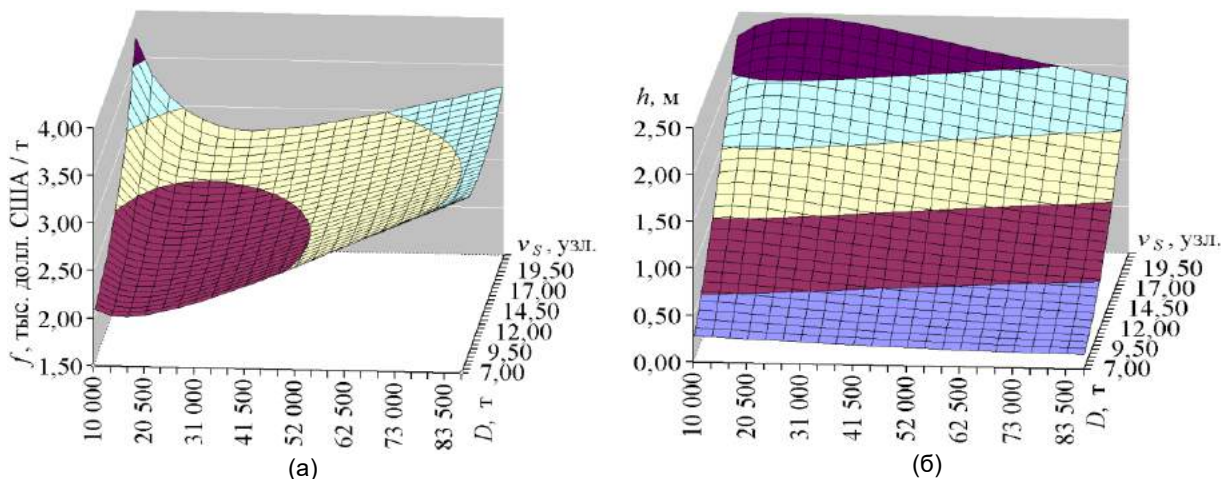


Рис. 4. Зависимости: (а) целевой функции  $f$  от переменных, в качестве которых использованы: характеристика размера судна – водоизмещение по грузовой марке  $D$  и эксплуатационная скорость судна  $v_s$  в открытой воде; (б) характеристики ледокольных качеств судна – толщины  $h$  форсируемого ледового поля от водоизмещения  $D$  и эксплуатационной скорости  $v_s$

По анализу графических функциональных поверхностей можно найти, что логичное с экономической точки зрения ограничение эксплуатационной скорости судна  $v_s$  на открытой воде и ограничение размера судна  $D$ , связанное с заданным размером субсидий в создание судна, учитываемое в форме штрафной (или премиальной) поправки к целевой функции  $f$  (Рис. 4, а), соответствуют несущественным эксплуатационным качествам судна во льдах, в рассматриваемом примере оцениваемым по наибольшей толщине  $h$  форсируемого сплошного ледового поля (Рис. 4, б).

**Выводы**

6.1. Классификация математических величин в составе моделей для оптимизации характеристик и элементов на начальных этапах проектирования многоцелевых судов ледового плавания, которая обычно осуществляется в группах величин: данные

(то есть, исходные данные или проектные ограничения), переменные (группа независимых искомым проектным характеристикам) и параметры (проектные элементы, подлежащие определению на более поздних стадиях проектирования) в известной мере условна, и возможна взаимозаменяемость этих величин, учитывая имеющиеся условия баланса их соотношений и параметрические зависимости между элементами.

6.2. При последовательном нахождении проектных характеристик и элементов используется свойство их суперпозиции, при котором та или иная совокупность характеристик и элементов определяется независимо от иных совокупностей ввиду несоразмерности интервалов их варьирования на каждом из этапов в последовательности проектирования судна или по причине имеющих параметрических зависимостей между этими величинами.

**Литература**

1. Гайкович, А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов: в 2 т. Т. 1: Описание системы «Корабль». Т. 2: Анализ синтез системы «Корабль». СПб. : Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014.
2. Пашин В.М. Оптимизация судов. Л. : Судостроение, 1983.
3. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V., Khromchenko E.B. The objective function for determining of design characteristics of multipurpose ship for navigation in icy sea, the methodological constraints, the optimality criterion. The 30th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, TEAM-2016, Mokpo, Korea – P. 561–573.
4. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Defining of the utility function and it use as the part of the optimality criterion in determining of design characteristics of multipurpose ice navigation ship // The 31th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2017. Osaka, 25–28 September 2017, Osaka, Japan: Program and Proceedings, 2017. P. 119.
5. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Dependence of displacement on the functions in ice field of multipurpose ship // The 29th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2015. Vladivostok, Russia. P. 95–104, ISBN 978–5–8343–0960–4
6. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Determination of project characteristics of merchant ship using economic criteria, objective functions and concepts of systematic approach // BIT’s 4th Annual World Congress of Ocean (WCO). Symposium 7: Traditional Ocean Industry. Qingdao, China, 2015, November 6–8. P. 76–77.
7. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V., Khromchenko E.B. Determination of load and displacement in the design of multipurpose ice navigation ship // The 29th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2015. Vladivostok : Russia. P. 80–86.
8. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V., Khromchenko E.B. The objective function for determining of design characteristics of multipurpose ship for navigation in icy sea, the methodological constraints, the optimality criterion // The 30th



- Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2016. Mokpo, Republic of Korea : 10–13 October 2016. Mokpo: Publishing house of Mokpo National University, 2016. P/ 561–573.
9. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V., Kulesh V.A. Safety of ships navigation in ice and operational effectiveness // Proceedings of the Twenty-third (2013) International Offshore and Polar Engineering. International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE). Anchorage, Alaska, USA, June 30–July 5, 2013. P. 1227–1234.
  10. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Multilevel systemic approach in the determining of the optimal design characteristics of ice navigation ship // The 31th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2017. Osaka, 25-28 September 2017. Osaka: Publishing of Osaka University and Osaka Prefecture University, 2017. P. 118.
  11. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. The dependences of displacement on icebreaking characteristics in designing of ship for navigation in freezing seas // The Twelfth (2016) Pacific-Asia Offshore Mechanics Symposium. PACOMS-2016. International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE). Gold Coast, Australia, October 4–7, 2016. P. 570–577.
  12. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. The innovative ships for navigation in Arctic seas // Northern Maritime Forum 2017. Qingdao, China: 2017. P. 463–474.

#### References

1. Gaykovich A.I. The theory of design of the ships displaced. 2 volumes. Volume 1. The description of the system «Ship». Volume 2. The analysis and the synthesis of the system «Ship». – S-Pb.: SIC «MORINTEX», 2014. ISBN 978–5–93887–060–4; ISBN 978–5–93887–048–2; ISBN 978–5–93887–0568–7.
2. Pashin V.M. Ship project optimization. – Leningrad: Shipbuilding, 1983.
3. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V., Khromchenko E.B. The objective function for determining of design characteristics of multipurpose ship for navigation in icy sea, the methodological constraints, the optimality criterion. The 30th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, TEAM-2016, Mokpo, Korea – P. 561–573.
4. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Defining of the utility function and it use as the part of the optimality criterion in determining of design characteristics of multipurpose ice navigation ship // The 31th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2017. Osaka, 25–28 September 2017, Osaka, Japan: Program and Proceedings, 2017. P. 119.
5. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Dependence of displacement on the functions in ice field of multipurpose ship // The 29th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2015. Vladivostok, Russia. P. 95–104, ISBN 978–5–8343–0960–4
6. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Determination of project characteristics of merchant ship using economic criteria, objective functions and concepts of systematic approach // BIT's 4th Annual World Congress of Ocean (WCO). Symposium 7: Traditional Ocean Industry. Qingdao, China, 2015, November 6–8. P. 76–77.
7. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V., Khromchenko E.B. Determination of load and displacement in the design of multipurpose ice navigation ship // The 29th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2015. Vladivostok : Russia. P. 80–86.
8. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V., Khromchenko E.B. The objective function for determining of design characteristics of multipurpose ship for navigation in icy sea, the methodological constraints, the optimality criterion // The 30th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2016. Mokpo, Republic of Korea : 10–13 October 2016. Mokpo: Publishing house of Mokpo National University, 2016. P/ 561–573.
9. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V., Kulesh V.A. Safety of ships navigation in ice and operational effectiveness // Proceedings of the Twenty-third (2013) International Offshore and Polar Engineering. International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE). Anchorage, Alaska, USA, June 30–July 5, 2013. P. 1227–1234.
10. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. Multilevel systemic approach in the determining of the optimal design characteristics of ice navigation ship // The 31th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM-2017. Osaka, 25-28 September 2017. Osaka: Publishing of Osaka University and Osaka Prefecture University, 2017. P. 118.
11. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. The dependences of displacement on icebreaking characteristics in designing of ship for navigation in freezing seas // The Twelfth (2016) Pacific-Asia Offshore Mechanics Symposium. PACOMS-2016. International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE). Gold Coast, Australia, October 4–7, 2016. P. 570–577.
12. Ogai S.A., Voyloshnikov M.V. The innovative ships for navigation in Arctic seas // Northern Maritime Forum 2017. Qingdao, China: 2017. P. 463–474.

УДК 656.61

**ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА****ВЛИЯНИЕ КНИЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ШПАНГОУТНОЙ ВЕТВИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ****Михаил Анатольевич Москаленко**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Теории и устройства судна  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел. +7(902) 4812121, e-mail: asmsh@rambler.ru

**Иван Борисович Друзь**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Теоретической механики и сопротивления материалов  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а  
e-mail: druz\_i\_b@mail.ru

**Аннотация**

Объем перевозок по Северному морскому пути имеет тенденцию к постоянному росту и продлению периода навигации. Поэтому, можно ожидать увеличения числа ледовых повреждений, как для новых судов, так и для имеющих значительный возраст эксплуатации. Хотя, правила постройки судов постоянно развиваются, введен в обязательную практику «Полярный кодекс», тем не менее, многие вопросы касающиеся работы кничных соединений в составе бортовых перекрытий судов ледового плавания и их влияние на предельную прочность балок набора остаются недостаточно изучены. В нормативной литературе отсутствуют обоснованные критерии дефектации, ремонта и подкрепления узлов кничных соединений, а предлагаемые методики носят качественный характер и сложны для применения на практике. Изучение влияния кничных соединений на предельные возможности шпангоута при действии сосредоточенного усилия проводилось авторами на моделях, путем постановки многофакторных планируемых экспериментов, что позволило оценить влияние кничных соединений на предельную прочность подкрепляемых балок и допускаемые остаточные повреждения.

**Ключевые слова:** кничные соединения, балки набора, ледовая нагрузка, предельная прочность

**THE INFLUENCE OF KNEE JOINT'S LIMIT STATE SHELL FRAME UNDER THE ACTION OF ICE LOADS****Mikhail A. Moskalenko**

Dr.Sci.Tech., professor  
Professor of Ship theory and structure department  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel. +7(902) 4812121, e-mail: asmsh@rambler.ru

**Ivan B. Druz**

Dr. Sci. Tech., professor  
Professor of department of Theoretical mechanics and strength of materials  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
e-mail: druz\_i\_b@mail.ru

**Abstract**

The volume of traffic along the Northern sea route has a tendency to continuous grown and extension of the navigation period. Therefore, we can expect an increase in the number of ice damage for both new buildings and for those who have a significant age of use. Although rules of construction are constantly evolving, introduced in the practice of a mandatory «Polar code», however, many questions concerning the work of knee joints in the composition side ceiling of ice navigation ships and their impact on the ultimate beams strength of a set are not sufficiently studied in the normative literature, there are no reasonable criteria of fault detection, repair and stiffening knee joints, proposed design methods are of a qualitative nature and difficult to apply in practice. Study of the influence knee joints to limit the possibility of the frame under the action of focused effort carried out by the authors on models by setting multi-factor planned experiments that allowed to assess the impact of knee joints on the ultimate strength of knee beams supported by and permissible residual damage.

**Key words:** knee joints, beams set, ice load, ultimate strength

### Введение

Объем перевозок по Северному морскому пути (СМП) имеет тенденцию к ежегодному увеличению. Освоение Арктики названо одной из стратегических задач России. Для решения поставленных задач, прогнозируется, что на СМП в ближайшее время появится около 40–50 новых постоянно оперирующих судов и порядка 100–200 судов обслуживающего флота. При таких масштабах освоения СМП можно ожидать резкого увеличения числа ледовых повреждений корпусов судов, как например, было при работе судов в восточном секторе Арктики в 80–83 гг., когда уровень повреждаемости превысил средние показатели в 3,7 раза (следует также отметить и то обстоятельство, что круглогодичная навигация в Арктике не проводилась даже во времена бывшего СССР).

При работе судна во льдах конструкции корпуса испытывают сложное напряженное состояние. Риски потери конструктивной безопасности при этом увеличиваются многократно. Анализ повреждаемости бортовых перекрытий судов ледового плавания (СЛП) проведенный авторами по результатам ремонтов СЛП более чем за 30 летний период и с учетом материалов кафедры «Конструкции судов» ДВПИ (собранных Н.В. Барабановым, В.Т. Луценко, Г.П. Шемендюком, В.А. Бабцевым и др.) дает ряд закономерностей. Прежде всего, повреждения шпангоутов свидетельствуют о действии ледовой нагрузки в виде сосредоточенных усилий ближе к средней части пролета (в районе пояса ПВЛ) и работе конструкции в пластической области с потерей балками устойчивости плоской формы изгиба (при этом возможна раздельная работа стенки, присоединенных поясков и кичных соединений). Пластические шарниры образуются вначале посередине пролета, а затем по концам книц или в районе узлов кичных соединений, поэтому по нашему мнению, кницу следует рассматривать как сминающийся элемент с изменяемой жесткостью по длине. Ледовые повреждения представляют собой в основном остаточные деформации балок с присоединенными поясками обшивки в виде вмятин и выпучин в стенках, потерю устойчивости плоской формы изгиба книц вместе с фланцами (или их разрушение по 3х шарнирной схеме вдоль катетов и средней линии (см. рис. 1)). Остаточные деформации конструкций корпуса СЛП, подтверждают правильность подходов к оценке прочности с использованием жесткопластической модели и критерия предельной прочности. Данные расчетные модели вошли в правила Российского морского регистра судоходства, во многом благодаря трудам Е. М. Апполонова [1]. Тем не менее, на сегодняшний день отсутствует единообразный подход к назначению длины расчетного пролета шпангоутной ветви подкрепленной кницами (кница считается абсолютно жесткой пластиной, а образование

пластических шарниров в балке полагают по концам книц). В практике судоремонта часто возникает необходимость оценки допустимой величины остаточных деформаций кичных соединений и их ремонтпригодности. Однако, в нормативных документах [2] и специальной литературе подобные рекомендации отсутствуют. Отсутствуют научно обоснованные критерии для дефектации, ремонта и подкрепления кичных соединений СЛП.



Рис. 1. Повреждения узлов кичных соединений

Данные о повреждаемости узлов кичных соединений СЛП свидетельствуют, что рассматриваемые узлы практически не подвержены усталостным повреждениям и в большинстве случаев поучают только пластические деформации.

Принимая допущение, что кница заделана одним катетом, а по другому действует распределенная нагрузка, можно полагать, что в результате действия этой нагрузки кница переходит в состояние безразличного равновесия, т. е. пластические шарниры в шпангоутной ветви образуются только в сечениях по концам книц. При дальнейшем увеличении нагрузки выше указанного уровня кница исчерпывает свою несущую способность.

Решения по методу экстремалей сосредоточенных деформаций [3] при указанных допущениях применительно к расчетной схеме, приведенной на (Рис. 2) в основном приведены в работе [4]. Как видно из рисунка, принятая линия сосредоточенных деформаций в предельном состоянии кницы проходит по экстремали, выходящей на кромки пластины в наиболее нагруженных точках у заделки, что характерно для повреждений при навалах судов (и соответствует узлу, где жесткость кницы больше или равна жесткости подкрепляемой балки, в противном случае должен реализоваться пластический шарнир в виде экстремали идущей из точки пересечения балок в узле до свободной кромки кницы).



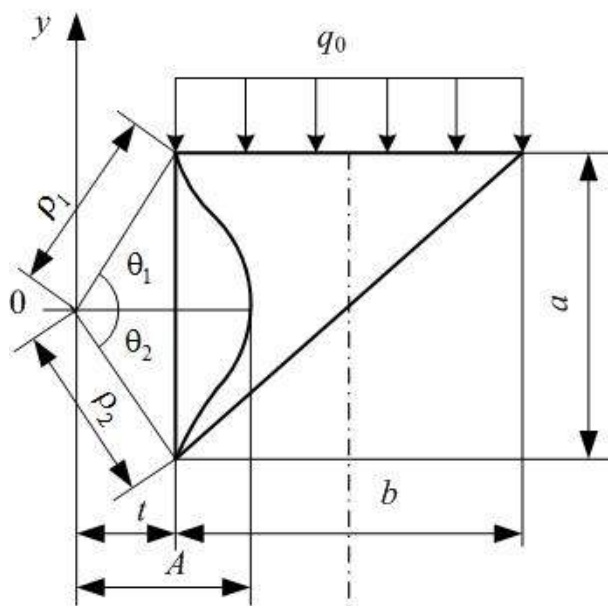


Рис. 2. Расчетная схема кницы [4]

Предельная нагрузка, действующая на кницу со стороны шпангоутной ветви определена в виде [4]:

$$\bar{q}_k = \left[ 3\tilde{b}^2 (1 + \tilde{b}^2) \right]^{0.5}, \quad (1)$$

где  $\bar{q}_k = q_0 / \sigma_T t_k$ ,  $\tilde{b} = b/a$  – отношение катетов кницы;  $t_k$  – толщина кницы;  $\sigma_T$  – предел текучести материала.

Интенсивность нагрузки (реакции кницы), приводящей участок стенки подкрепляемой балки вдоль катета кницы в состояние безразличного равновесия (по аналогии с (1)), определяют в виде [4]:

$$\bar{q}_c = \left[ 3\bar{b}^2 (1 + \bar{b}^2) \right]^{0.5}, \quad (2)$$

где  $\bar{b} = b/2h$ ,  $t_c$  – толщина стенки подкрепляемой балки;  $h$  – высота стенки.

Полученные аналитические зависимости (1) и (2) позволяют оценивать повреждаемость узла кничного соединения. Действительно, задавшись соотношением:

$$f = q_k / q_c. \quad (3)$$

При  $f > 1$  для шпангоутной ветви, находящейся в состоянии, близком к предельному, вначале будет повреждаться стенка подкрепляемой балки, при  $f < 1$  вначале будет повреждаться кница, а при  $f = 1$  кница и стенка удовлетворяют условию равнопрочности. Нетрудно видеть, что условие равнопрочности достигается для  $b = a = 2h$ . При меньших значениях будет повреждаться кница, больших стенка подкрепляемой балки.

Для оценки технического состояния кничных соединений, получивших остаточные деформации, рассмотрим кинематический механизм наступления предельного состояния шпангоутной ветви по 3-х шарнирной схеме, с образованием пластического шарнира вначале посередине пролета, а затем в самой книце. Учитывая использование жесткопластической идеализации, разрушение одного элемента еще не ведет к предельному

состоянию конструкции в целом. Поэтому, при разгрузке необходимо оценить несущую способность по уровню остаточных пластических деформаций. Упрощая задачу и исключая нелинейность, применим механическую аналогию. Будем считать, что за счет пластического деформирования кницы, на стенки узла действуют усилия вызывающие его сдвиговое деформирование (см. рис. 3). С учетом коэффициента жесткости узла в форме Т. Милчерта [5]:

$$K_j = M/Y_w, \quad (4)$$

где  $M$  – момент в узле;  $Y_w$  угол сдвига.

Примем  $t = t_c = t_k$ , и равнобокую кницу, где  $b = a$ .

Для остаточной жесткости бесконечного узла согласно [5] с учетом (4):

$$K_j = Gth^2. \quad (5)$$

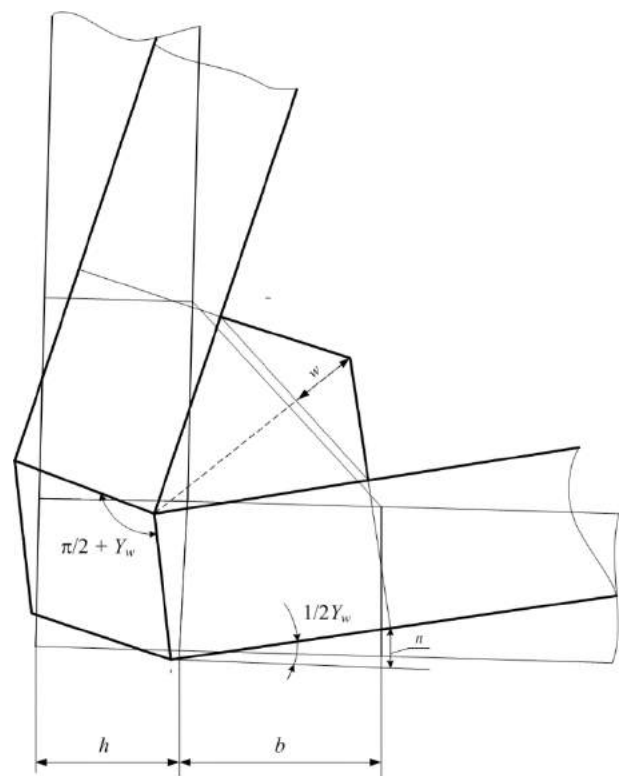


Рис. 3. Сдвиг в узле

Для остаточной жесткости кницы согласно [5] с учетом (4):

$$K_{jk} = Gth(2h + b)/2, \quad (6)$$

где  $G$  – модуль сдвига.

Зададимся, учитывая зависимости (5) и (6), соотношением:

$$K = K_{jk}/K_j = 1 + b/2h = 1 + \bar{b}. \quad (7)$$

Теперь из (7) нетрудно видеть, что кницу следует рассматривать как пластину состоящую из жесткой и гибкой части –  $\bar{b}$ , что хорошо согласуется с соотношением (3). При  $b = 2h$  достигается равнопрочность стенки балки и гибкой части кницы.

За счет сдвига –  $n$ , балок в узле, остаточный прогиб кницы по свободной кромке –  $w = 2n$ , (см. рис. 3) образуется при реализации кинематического

механизма обрушения шпангоутной ветви по 3-х шарнирной схеме. Для выработки рекомендаций к дефектации книц по максимальному остаточному прогибу (измеренному поперек свободной кромки поврежденной кницы) воспользуемся формулой предложенной А. И. Максимаджи, для максимального прогиба во вмятине. С учетом ограничений по относительному удлинению материала  $[\sigma] = 5\%$  (что соответствует коэффициенту запаса 3, против относительного удлинения в 15 %, при одноосном растяжении образца, принятого для большинства судостроительных сталей) согласно [6]:

$$f_{\max} = 0,8L^2[\sigma]/8h. \quad (8)$$

Приняв в качестве  $L$  длину расчетного пролета балки и приведя допускаемый остаточный прогиб к точкам по концам книц, после упрощений, с учетом 3-х шарнирного кинематического механизма обрушения шпангоутной ветви, получим норматив для допускаемого остаточного прогиба измеренного поперек свободной кромки кницы:

$$[w] = 0,04L \bar{b} \quad (9)$$

Нагрузка потери несущей способности конструкции всегда меньше предельной. В общем случае, изгиб шпангоутной ветви сопровождается возникновением в сечениях балки изгибающего момента, продольной и перерезывающей сил. Следует отметить, что в реальной конструкции находящейся под действием сосредоточенной ледовой нагрузки осуществить распор, за счет сближения опор, практически невозможно. Поэтому, действием продольной силы в практических расчетах можно пренебречь.

При этом, остаются нерешенными вопросы об учете влияния книц на предельные возможности подкрепленной шпангоутной ветви. Неопределенность в этом вопросе приводит к тому, что балки подкрепленные кницами рассматриваются как призматические, без учета влияния переменности сечения на опорах, а кница считается абсолютно жесткой и реализуется схема обрушения балки с образованием пластических шарниров по концам книц. Тем не менее, как можно видеть из оценок представленных выше, кницы не являются абсолютно жесткими элементами и к их влиянию, на величину изгибающих моментов и перерезывающих сил в подкрепляемой балке, следует подходить дифференцировано.

Для проверки характеристик увеличения несущей способности подкрепленной шпангоутной ветви по отношению к бескничной конструкции нами были проведены факторные эксперименты на моделях шпангоутных рамок с присоединенными поясками, приставными и врезными кницами с фланцами, изготовленными из белой рулонной жести толщиной 0,25 мм с пределом текучести 286 МПа. Диаграмма растяжения жести аналогична диаграмме растяжения малоуглеродистой стали, что позволяет моделировать пластические деформации в конструкции. Для проверки адекватности полученных зависимостей, дополнительно были проведены эксперименты на полунатурных моделях изготовленных из углеродистой стали толщиной 2 мм с пределом текучести 230 МПа. Для моделирования использовался метод подобия явления увеличения несущей способности модели с кницами по отношению к бескничной конструкции. В соответствии с этим методом при моделировании

исходили из допущения о том, что реальная конструкция и модель удовлетворяют эллиптическому уравнению предельной кривой:

$$(M_{оп}/M_0)^2 + (N_{оп}/N_0)^2 = 1, \quad (10)$$

где  $M_{оп}$  и  $N_{оп}$  – изгибающий момент и перерезывающая сила в опорных сечениях;  $M_0$  и  $N_0$  – предельный изгибающий момент и перерезывающая сила.

Поскольку уравнение (10) представлено в безразмерном виде, то согласно первой теореме подобия, подобие явления (после несложных преобразований) можно представить в виде критерия подобия:

$$U = P_{км}/P_m = P_k/P = idem, \quad (11)$$

где  $P_{км}$  и  $P_m$  – предельная нагрузка для модели кничной и бескничной конструкции;  $P_k$  и  $P$  – предельная нагрузка для натурной кничной и бескничной конструкции.

Соотношение (11), позволяет получать одинаковые количественные оценки, для эффекта от применения книц, как для модели, так и для натурной конструкции. Основной целью экспериментальных исследований было установление эмпирической зависимости величин  $K$  и  $U$  (7), (11) от жесткости шпангоутной ветви  $\bar{l}$  (l должно быть как в формулах 12, 13) и размеров книц, а также уточнение величины  $d_r$ , представляющей собой ту часть кницы, которая при реализации предельного состояния шпангоутной ветви работает как жесткая (см. рис. 4). Для построения искомых функциональных зависимостей выполнялись 3-х факторные эксперименты. В качестве расчетного использовалось полиномиальное уравнение второй степени стандартного вида. Коэффициенты уравнения проверялись на значимость по критерию Стьюдента. Искомые параметры находили в виде следующих функциональных зависимостей:

$$K = f(\bar{b}, \bar{a}, \bar{h}(\bar{l})), \quad (12)$$

$$U = f(\bar{b}, \bar{a}, \bar{h}, (\bar{l})), \quad (13)$$

где  $\bar{b} = b/l, \bar{a} = a/l, \bar{h} = h/l, \bar{l} = l/h$ ,  $l$  (должно быть как в формулах 12, 13) – длина пролета балки.

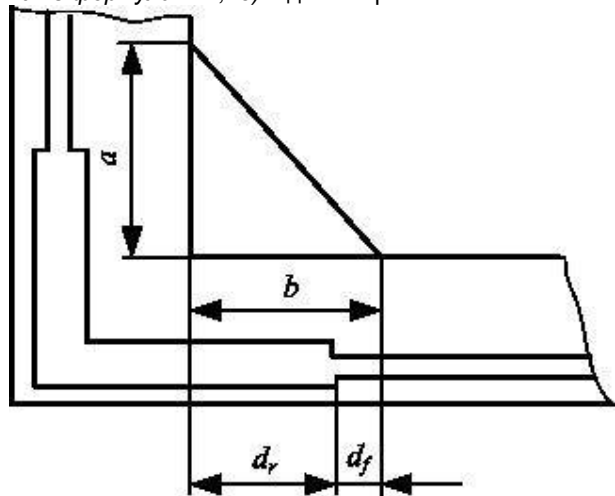


Рис. 4. Моделирование кницы участками

Для проведения опытов, составлялся ротатбельный план Бокса (см. табл. 1).

Нагружали модели шпангоутных рамок на универсальной гидравлической машине ГМС-20, вплоть до образования пластических шарниров, что хорошо видно на образцах после испытаний (см. рис. 5, 6, 7, 8).

Результаты опытов позволили получить эмпирические функциональные зависимости увеличения несущей способности подкрепленной кницами шпангоутной ветви по отношению к бесконичной конструкции (12), (13), что представлено на графиках (см. рис. 9). Проверка по критерию Фишера дала стандартную ошибку опыта в 5 %. Для более точного учета влияния книц на предельную прочность шпангоутной ветви можно использовать безразмерную величину жесткого участка  $d_r = d_r/l$

как в формулах 12,13). Как показали результаты опытов, кница в реальном диапазоне соотношения геометрических параметров, имеет значительную гибкость и обрушение происходит в действительности по концам жестких участков, относительная длина которых может быть определена из полученного полинома:

$$d_r = 0,0420 - 0,0038X_1 - 0,0009X_2 - 0,0134X_3 - 0,0004X_1X_2 + 0,0059X_1^2 + 0,0076X_3^2, \quad (14)$$

где  $X_1 = (\bar{d} - 0,137)/0,040$ ;

$X_2 = (\bar{a} - 0,137)/0,040$ ;

$X_3 = (\bar{h} - 0,0080)/0,020$ .

Таблица 1

План эксперимента (пример)

№	Именованные факторы варьирования			Кодовые факторы варьирования		
	$\bar{b}$	$\bar{a}$	$\bar{h}$	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	2	3	4	5	6	7
1	0,177	0,177	0,100	+	+	+
2	0,177	0,097	0,100	+	-	+
3	0,097	0,177	0,100	-	+	+
4	0,097	0,177	0,100	-	-	+
5	0,177	0,097	0,060	+	+	-
6	0,177	0,177	0,060	+	-	-
7	0,097	0,097	0,060	-	+	-
8	0,097	0,177	0,060	-	-	-
9	0,069	0,097	0,080	-1,682	0	0
10	0,206	0,137	0,080	+1,682	0	0
11	0,137	0,137	0,080	0	-1,682	0
12	0,137	0,069	0,080	0	+1,682	0
13	0,137	0,206	0,046	0	0	-1,682
14	0,137	0,137	0,114	0	0	+1,682
15	0,137	0,137	0,080	0	0	0
16	0,137	0,137	0,080	0	0	0
17	0,137	0,137	0,080	0	0	0
18	0,137	0,137	0,080	0	0	0
19	0,137	0,137	0,080	0	0	0
20	0,137	0,137	0,080	0	0	0

**Закключение**

1. В опытах поведение балок подчинялось единой закономерности: при достижении нагрузки посередине пролета предельного значения ее рост прекращался при увеличении прогибов. В местах кничных соединений наблюдалось появление четко выраженных сломов(экстремалей сосредоточенных деформаций), реализующих пластические шарниры типа «конверт». На относительно жестких балках в районе действия нагрузки в стенке образовывались выпучины и пластические шарниры типа «конус». Во всех опытах реализовывался 3х шарнирный кинематический механизм разрушения, что хорошо подтверждает использование жесткопластических моделей. Об-разование всех пластических шарниров заканчивалось приблизительно одновременно.

2. Во всех опытах наблюдалось сближение опор, что подтверждает невозможность реалии-зации распора в рамных конструкциях. Поэтому, использование эллиптического уравнения предельной кривой в форме (10) является достаточным для расчетов. Увеличение предельной прочности шпангоутной ветви при использовании книц с фланцем (пояском) зависит от жесткости балки и может составлять порядка 15–35 % в

реальных диапазонах типоразмеров книц (по отношению к бесконичной конструкции), что необходимо учитывать при подкреплении и проектировании балок набора СЛП введением дополнительной поправки к жесткости кницы.

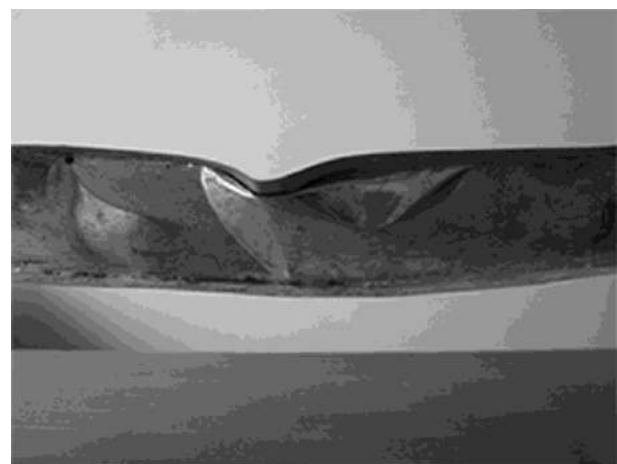


Рис. 5.

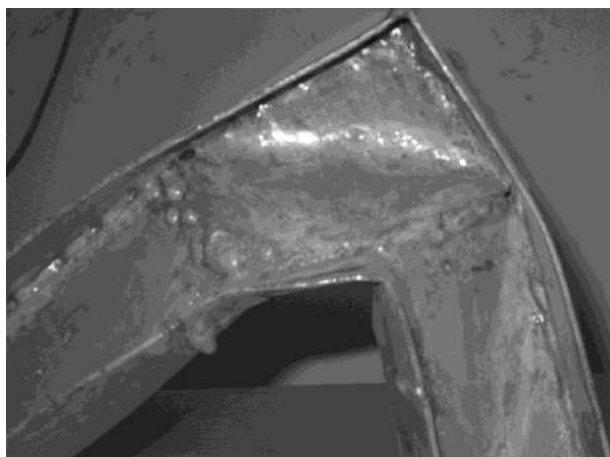


Рис. 6.

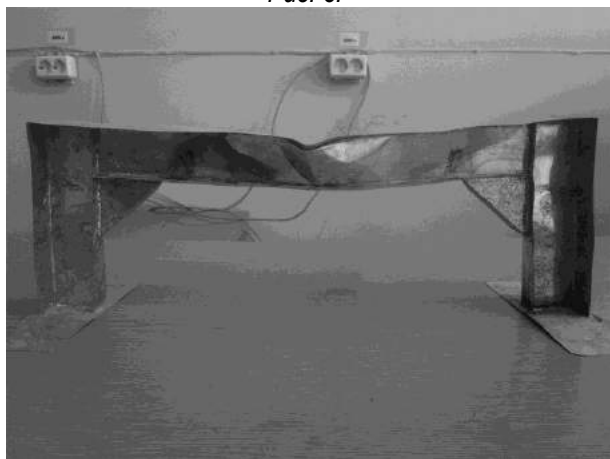


Рис. 7.

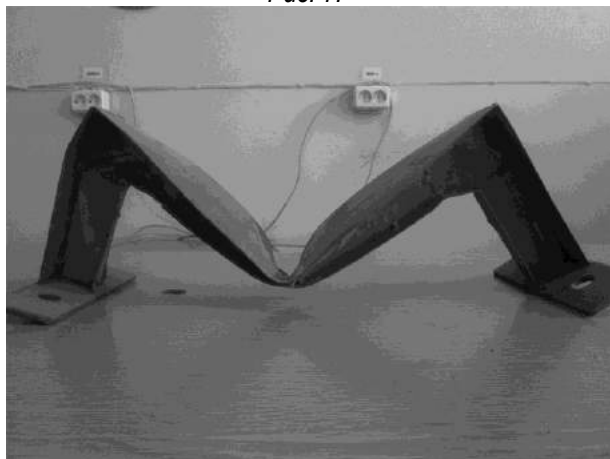


Рис. 8.

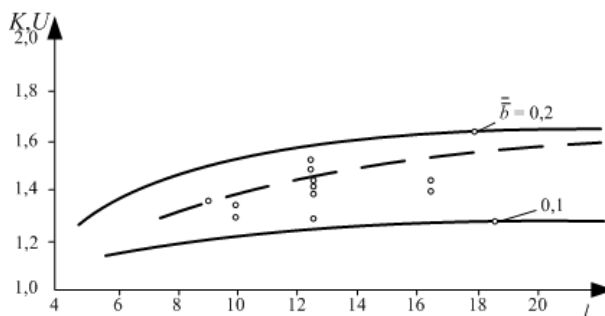


Рис. 9. Результаты эксперимента

3. Опыты подтверждают, что при пластическом деформировании кница разбивается на два участка: жесткий и гибкий в соотношении примерно 1/2–1/3 в реальных диапазонах гибкостей шпангоутной ветви. При гибкости более 20, кница ведет себя как полностью жесткая. Причем, гибкий участок кницы  $d_f$  дает дополнительное приращение угла сдвига, поэтому схема обрушения шпангоутной ветви по концам книц на практике не реализуется и расчетная длина пролета балки должна подлежать редуцированию. Величина допустимой остаточной деформации кницы  $[w]$  определенная по (9) получается несколько завышенной и с учетом гибкости кницы и следует ввести в формулу эмпирический коэффициент порядка 0,5.

4. В узлах кничных соединений СЛП не следует рассматривать кницу как сминающийся элемент, предохраняющий от повреждения образующие узел балки, так как образование пластического шарнира способно привести к обрушению всей конструкции по типу «слабого звена». Поэтому, по нашему мнению, следует при проектировании и ремонте исходить из условий обеспечения равнопрочности кницы и стенки подкрепляемой балки. Для увеличения изгибной жесткости книц, при ремонте, можно рекомендовать устанавливать на 1/2 длине катета подкрепляющее ребро жесткости, или дополнительный фланец (поясок) внахлест к существующему.

#### Литература

1. Апполонов Е. М. Предельная прочность арктических судов. – СПб.: Крылов. гос. науч. центр, 2014. – 244 с.
2. Приложения к руководству по техническому наблюдению за ремонтом морских судов / Российский морской регистр судоходства. – СПб., 2005. – 290 с.
3. Ржаницын А. Р. Предельное равновесие пластин и оболочек. – М. Наука, 1983. – 288 с.
4. Москаленко М. А. Особенности дефектации кничных соединений по критерию предельной прочности // Проблемы транспорта Дальнего Востока: Пленарные доклады одиннадцатой международной научно-практической конференции. – Владивосток: ДВО ПАТ, 2015. С. 50–51.
5. Хьюз О. Ф. Проектирование судовых корпусных конструкций. Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1988. – 360 с.
6. Максимаджи А. И. Оценка технического состояния корпусов морских судов. – Л., Судостроение, 1982. – 156 с.

#### References

1. Appolonov E. M. Predelnaia prpochnost arkticheckih sudov. – SPb.: Kryilov. gos. nach. tcentr, 2014. – 244 s.

2. Prilozheniya k rukovodstvu po tekhnicheskomu nabludeniю za remontom morskikh sudov / Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. – SPb., 2005. – 290 s.
3. Rzhaniytsin A. R. Predelnoe равновесие пластин и оболочек. – М. Наука, 1983. – 288с.
4. Moskalenko M. A. Osobennosti defektatsii knichnyikh soedinenii po kriteriiu predelnoi proshnosti // Problemy transporta Dalnego Vostoka: Plenarnyye dokladyi odinnadcatoi mejdunarodnoyi nauchno-prakticheskoyi konferencii. – Vladivostok: DVO RAT, 2015. S. 50–51.
5. Khuz O. F. Proektirovanie sudobyikh korpusnyikh konstrukcii. Per. s angl. – L.: Sudostroenie, 1988. – 360 s.
6. Maksimadzhi A. I. Ocenka tekhnicheskogo sostoianii korpusov morskikh sudov. – L., Sudostroenie, 1982. – 156 s.

УДК 621.43.013 – 629.3

**СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ  
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)****КОМБИНИРОВАНИЕ ФИЛЬТРОВАНИЯ И ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ –  
ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ПОЛНОПОТОЧНОЙ ТОНКОЙ ОЧИСТКИ МАСЛА  
В ДВУХКОНТУРНЫХ СИСТЕМАХ СМАЗКИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ****Геннадий Петрович Кича**

доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой Судовых двигателей внутреннего сгорания  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: (423) 251-52-26; e-mail: kicha@msun.ru

**Борис Николаевич Воробьев**

кандидат технических наук, доцент  
доцент кафедры Судовых двигателей внутреннего сгорания  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: (423) 251-52-26; e-mail: vorobjev@msun.ru

**Людмила Анатольевна Семенюк**

старший преподаватель  
кафедры Судовых двигателей внутреннего сгорания  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: (423) 251-52-26; e-mail: semenuk@msun.ru

**Аннотация**

Актуальность исследований по повышению эффективности тонкой очистки моторного масла в судовых дизелях обусловлена спецификой его старения, вызываемой сжиганием низкосортных топлив, повышением тепловой и механической напряженности двигателей.

Доказана рациональность использования для ресурсосберегающего маслоиспользования, когда повышается ресурсные показатели и надёжность работы дизелей, снижается расход смазочного масла, комбинированной его очистки. Новизна выполненных исследований состоит в разработке принципов и систем комбинированной очистки моторного масла фильтрованием и центрифугированием, при которых достоинства и преимущества каждого метода используются наиболее полно. На примере тонкой очистки масла в двухконтурных системах смазки показана реализация оптимального сочетания полнопоточного фильтрования и центрифугирования для полной защиты вкладышей подшипников двигателей от абразивного изнашивания и проворачивания, снижения интенсивности старения масла М-10-Г<sub>2</sub>(цс) из-за низкой концентрации в них нерастворимых продуктов, в том числе катализаторов окисления.

Показаны пути совершенствования очистки моторного масла комбинированием фильтрования и центрифугирования, а также достигнутые результаты о повышении её эффективности по данным эксплуатационным испытаниям на судах.

**Ключевые слова:** ресурсосберегающее маслоиспользование, расход и угар масла, старение масла, комбинированная очистка масла, очистка моторного масла, фильтрование, центрифугирование, изнашивание двигателя, ресурсные показатели двигателя

**THE COMBINATION OF FILTRATION AND CENTRIFUGATION –  
AN EFFICIENT METHOD IS FULL-FLOW FINE FILTRATION OF OIL IN A  
DUAL CIRCUIT LUBRICATION SYSTEMS OF MARINE DIESEL ENGINES****Gennady P. Kicha**

Professor, Dr. Sci. Tech.  
director of the department of Marine internal combustion engines  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: (423) 251-52-26; e-mail: kicha@msun.ru

**Boris N. Vorob'iov**

associate professor, Cand. Sci. Tech.  
associate professor of the department of Marine internal combustion engines  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: (423) 251-52-26; e-mail: vorobjev@msun.ru

**Liudmila A. Semeniuk**

senior lecturer



of the department of Marine internal combustion engines  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: (423) 251-52-26; e-mail: k.semenuk@msun.ru

### Abstract

The relevance of research to improve the efficiency of fine cleaning of engine oil in marine diesel engines is due to the specifics of its aging caused by the burning of low-grade fuels, increased thermal and mechanical stress of engines.

The rationality of use for resource-saving oil use is proved, when the resource indicators and reliability of diesel engines are increased, the consumption of lubricating oil and its combined cleaning are reduced. The novelty of the research consists in the development of principles and systems of combined purification of engine oil by filtration and centrifugation, in which the advantages and advantages of each method are used most fully. On the example of fine oil purification in two-circuit lubrication systems shows the implementation of an optimal combination of full-flow filtration and centrifugation for full protection of bearing bearings from abrasive wear and turning, reducing the intensity of aging oil M-10-G2(CA) due to the low concentration of insoluble products, including oxidation catalysts.

The ways of improving the purification of engine oil by combining filtration and centrifugation, as well as the results achieved to improve its efficiency according to operational tests on ships are shown.

**Key words:** resource-saving oil use, consumption and waste of oil, ageing of oil, combined purification oil, purification engine oil filtration, centrifugation, wear of engine, resource performance of engine

### Введение

Создание надежно работающего дизеля с высоким наддувом, имеющего наибольшие экономичность и ресурс, – одна из задач научно-технической программы развития судового дизелестроения до 2030 г. Согласно этой доктрине, основным направлением развития двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в нашей стране и за рубежом является повышение агрегатной мощности, эксплуатационной экономичности по топливу и маслу, увеличенные ресурсов и надежности, снижение удельной металлоёмкости их и затрат труда на обслуживание [1].

Использование высокого наддува в дизелях ужесточает условия функционирования системы смазки. Повышение удельных мощностных показателей приводит к росту тепловой и динамической напряженности дизеля. При этом из-за более тяжелых условий смазки и работы пар трения двигателя чувствительность его к качеству масла и концентрации в нем абразивных частиц значительно повышается. Ужесточение требований к качеству очистки моторного масла в форсированных ДВС обусловлено уменьшением рабочих зазоров в его парах трения, применением биметаллических вкладышей с тонким приработочным покрытием и высокой абразивностью тонкодисперсной фазы нерастворимых продуктов в масле. Интенсивному загрязнению ими моторного масла (ММ) способствует работа двигателя на высокозольных маслах и сернистом низкосортном топливе типа мазутов, имеющих вредные металлосодержащие включения.

Тонкодисперсные нерастворимые продукты износа двигателя и срабатывания присадок катализирующие действуют на масло и интенсифицируют его старение. Глубина очистки моторного масла и надежность защиты пар трения двигателя от механических примесей определяют их износ и нагаро- и лакообразование в ДВС. От количества содержащихся в масле присадок в активной форме и загрязнений в значительной мере зависят состояние цилиндропоршневой группы, угар масла и расход топлива в двигателе. Убытки при эксплуатации ДВС вследствие недооценки роли

смазки и очистки моторного масла, из-за несовершенства маслоочистителей и низкого качества смазочных материалов, ежегодно исчисляются значительными суммами.

Дальнейшее развитие комбинированной очистки масла в ДВС по полнопоточной схеме вылилось в присоединение дополнительного контура центрифугирования к основному на линии входа рабочего тела системы смазки. [1, 2]. При этом снижается грязевая нагрузка на фильтр, что способствует увеличению срока службы фильтрующих элементов (ФЭ). Кроме того, реализуются все достоинства очистки масла центрифугированием, так как эффективно удаляются мелкодисперсные нерастворимые зольные продукты изнашивания двигателя и срабатываний многофункциональных присадок, являющихся катализаторами окисления.

### 1. Принципы и схемы комбинированной очистки моторного масла в ДВС фильтрованием и центрифугированием

Химмотология будучи новой развивающейся отраслью науки о свойствах, качестве и рациональном использовании топлив, смазочных материалов в технике, призвана сократить эти потери. Проведенные исследования по совершенствованию очистки масла в форсированных ДВС базируются на ее основных положениях и рассматривают систему «дизель – топливо – масло – эксплуатация» во взаимодействии всех её составляющих.

Для современных полнопоточных фильтров тонкой очистки масла (ФТОМП) характерно противоречие между тонкостью отсева и сроком службы фильтрующих элементов (ФЭ), полнотой отсева и надежностью защиты пар трения от попадания механических примесей. Приемлемый компромисс между указанными показателями эффективности фильтра возможен только для ДВС без наддува или с низкой форсировкой [2].

При очистке масла ФТОМП в дизелях с высоким наддувом, особенно в случае сжигания моторного топлива и мазутов, названные противоречия препятствуют достижению длительных сроков

службы масла и высоких ресурсных показателей ДВС.

Улучшение системы очистки моторного масла с одновременным сокращением его расхода и повышением ресурсных показателей судовых форсированных дизелей достигнуто путём

разработки новых комбинированных маслоочистительных комплексов (КМОК). Их создание осуществлено на основе принципов (см. рис. 1), позволивших полностью реализовать возможности комбинированной очистки моторного масла.

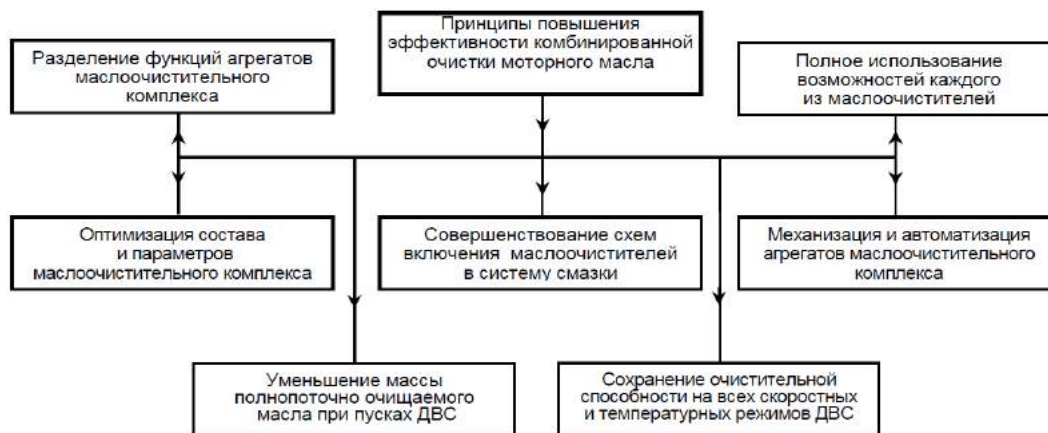


Рис. 1. Направления повышения эффективности комбинированной очистки моторного масла

Функции агрегатов маслоочистительного комплекса разграничены так, что для защиты пар трения двигателя от наиболее опасных, крупных частиц загрязнений используются преимущества полнопоточного фильтрования, а для глубокой очистки от тонкодисперсных абразивных, особенно зольных нерастворимых примесей – преимущества центрифугирования.

Последовательное включение агрегатов КМОК в систему смазки ДВС (Рис. 2) облегчает функционирование ФТОМП, так как на фильтр поступает центрифугированное масло. Увеличение доли его за счет использования центрифуг с напорным сливом способствует удлинению срока службы ФЭ.

Гидравлическая связь основного контура очистки (с помощью фильтра) и вспомогательного (очистка центрифугированном), установка напорного дросселя после центрифуги, автономная подача масла на гидравлический привод ротора очистителя и центрифугирование обеспечивают высокую интенсивность очистки масла на всех, скоростных режимах работы дизеля [3].

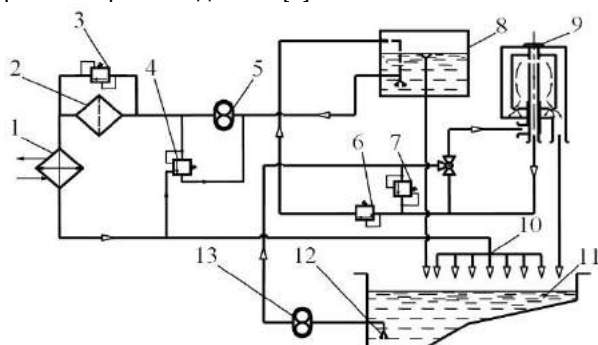


Рис. 2. Перспективная СТОМ судовых форсированных дизелей: 1 – холодильник; 2 – ФТОМП;

3 – предохранительный клапан; 4 – дроссельный распределитель; 5 – нагнетательный насос; 6 – напорный клапан; 7 – переливной клапан; 8 – бак;

9 – центрифуга с напорным сливом;

10 – распределительная магистраль; 11 – картер; 12 – заборник; 13 – откачивающий насос

За счет дроссельного распределителя, установленного перед ФТОМП и имеющего обратную связь с потребителями масла, давление в главной магистрали поддерживается на одном уровне. Кроме того, дроссельный распределитель уменьшает массу полнопоточно фильтруемого холодного масла, что исключает пропуск к парам трения неочищенного масла в течение всего срока службы ФЭ. Механизация процесса удаления отложений из ротора центрифуги способствует увеличению продолжительности безвахтенной работы системы очистки (смазки). В дизелях последнего поколения при использовании унифицированных судовых масел она доведена до 3 тыс. ч.

Оптимизация состава и параметров комбинированного маслоочистительного комплекса показала, что наибольший совокупный эффект в комбинированной очистке моторного масла может быть достигнут при длительном полнопоточном без перепуска мимо ФТОМП фильтровании его с тонкостью отсева 25 – 40 мкм, центрифугировании с удельной интенсивностью очистки 0,5 – 1 г/(кВт · ч) при отношении характеристики интенсивности очистки масла центрифугой к аналогичному показателю фильтра, равном 8 – 20. Данное соотношение между эффективностью центробежного очистителя и фильтра получено при факторе разделения центрифуг более 3000, удельном приходящемся на единицу загрязнения масла нерастворимыми продуктами индекс производительности 4 – 8 м<sup>2</sup>·ч/г и пропускной способности не менее 20% массы полнопоточно фильтруемого масла.

КМОК соответствует дизелю при следующих удельных показателях: по поверхности фильтрации – 0,015–0,028 м<sup>2</sup>/кВт, по вместимости роторов и индексу производительности центрифуг соответственно 2,5 – 3,9 см<sup>3</sup>/кВт и 0,064–0,092 м<sup>2</sup>/кВт. Выбор агрегатов маслоочистительного комплекса в указанных пределах рабочих параметров позволяет полностью реализовать резервы повышения

эффективности тонкой очистки моторного масла комбинированием фильтрации и центрифугирования.

**2. Методика и результаты моторных испытаний очистителей масла**

Для комплектования систем очистки масла судовых форсированных тронковых дизелей разработан типоразмерный ряд очистителей. Полнопоточный масляный фильтр с одним-двенадцатью ФЭ типа «Восток-6» или «Нарва-6» [4] способен с тонкостью отсева 20 – 45 мкм фильтровать до 120 м<sup>3</sup>/ч масла. Особенности конструкции ФТОМП восьми типоразмеров являются двухъярусное расположение фильтрующих элементов при числе их более шести и приспособленность конструкций для использования как отечественных, так и зарубежных ФЭ. Фильтры снабжены предохранительными клапанами, сигнализаторами полного загрязнения элементов и необходимости их замены.

Для комбинированной очистки масла рекомендуется использовать фильтрующий материал с высокими пропускной способностью и грязеемкостью, что достигается за счет его регулярной пористой структуры (при пористости более 80 %) и достаточно высокой прочности. Наилучшие результаты получены при использовании ФЭ из бумаги мокрого формования, например БМ-70 (ТУ 1304526 – 82).

Центрифугирование моторного масла следует вести центробежными маслоочистителями с наружным гидрореактивным приводом, с напорным сливом (полнопоточными) (МЦН–НС). Для судовых дизелей разработано шесть типоразмеров центрифуг (с четвертого по девятый) с вместимостью ротора от 1060 до 8000 см<sup>3</sup> и индексом производительности 26 – 186 м<sup>2</sup>.

Разработанные отечественные центрифуги МЦН-НС с напорным сливом полностью соответствуют ГОСТ 10556 – 78. Особенностью их конструкций является наличие в корпусах регулирующих и контролируемых устройств: напорного и переливного клапанов, крана отключения центрифуги, датчиков сигнализатора открытия переливного клапана и т. д. [3,4]. Центрифуги способны отделять воду. При использовании их отпадает необходимость контролировать гидравлический затвор ротора центрифуг, исключаются потери масла через сливное отверстие для выхода воды. Некоторые конструкции МЦН-НС выполнены самоочищающимися, т. е. отложения из роторов автоматически удаляются в грязесборник. Скоростные характеристики центрифуг улучшены путем применения «всплывающего» ротора и разделительных диафрагм для предотвращения торможения его из-за разбрызгивания масла [2]

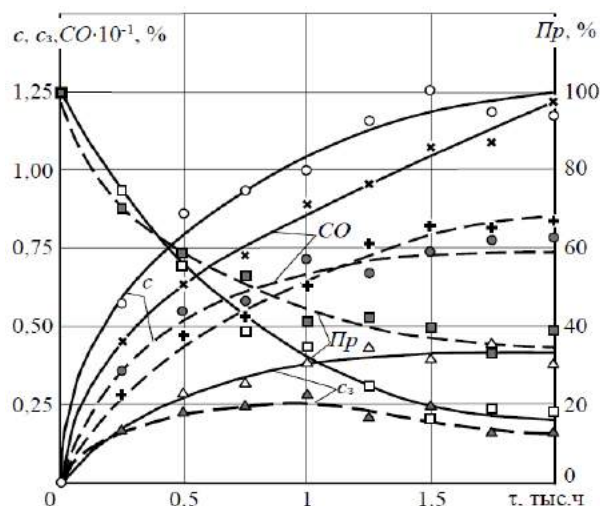


Рис. 3. Кинетика старения масла в судовом дизеле 4ЧН 22/24 с высоким наддувом:  
 ---- полнопоточное фильтрование масла;  
 - - - комбинированное фильтрование.

Химмотология нового комбинированного маслоочистительного комплекса исследовалась в дизелях типа ЧНС18/22 (ДД104 завода «Дальдизель») и ЧН22/24 (4R22В Ваца фирмы «Вяртсиля»). Испытания велись на дизельном топливе Л (ГОСТ 305– 82). Коэффициент использования мощности двигателей составлял 0,7 – 0,8. По сравнению с ФТОМП (Рис. 3) он обеспечивает в 1,5 – 2,2 раза более глубокую очистку масла марки М-10-Г<sub>2</sub>(цс) (ТУ 38101548 – 75) от нерастворимых продуктов. Так, после 2 тыс. ч работы с КМОК в масле накапливается не более 0,8 общих х и 0,17 % зольных х<sub>з</sub> нерастворимых в бензине примесей (ГОСТ 20584 – 75). При очистке масла ФТОМП за этот же период х и х<sub>з</sub>, соответственно выше: 1,2 и 0,38 %.

Более интенсивное удаление из масла комбинированным маслоочистительным комплексом нерастворимых продуктов тормозит его окисление и срабатывание присадок. При работе системы с ФТОМП массовая доля активных присадок Pr, определенная на основе диализа по методике Центрального научно-исследовательского дизельного института, в масле составляла 17 % концентрации их в свежем масле, при комбинированной очистке – 34 %.

Степень окисления СО масла марки М-10-Г<sub>2</sub>(цс), рассчитанная по данным инфракрасной спектроскопии, на базовом этапе (ФТОМП) не стабилизировалась, и к 2,5 тыс. ч работы концентрация карбоксилсодержащих соединений равнялась 13,7 %. При использовании КМОК, за этот же период продукты группы СО достигали в масле 8,7 %, т. е. степень окисления масла была в 1,6 раза ниже.

**3. Эксплуатационная эффективность комбинированных маслоочистительных комплексов на судах**

Результаты длительных моторных испытаний на теплоходах ФТОМП и КМОК (см. Таблицу 1) показывают рациональность комбинированной очистки моторного масла в судовых форсированных

дизелях типов ЧН18/22 и ЧН22/24. Преимущество нового маслоочистительного комплекса выразилось в более эффективном удалении из масла нерастворимых примесей. Интенсивность очистки масла КМОК в 14–18 раз выше, чем ФТОМП.

Таблица 1

**Моторная эффективность средств очистки моторного масла в дизелях**

Показатель	Марка дизеля					
	8ЧНСП 18/22		4ЧН 22/24		6ЧН 25/34	
	Система очистки масла					
	ФТОМП	КМОК	ФТОМП	КМОК	ФТОМП	КМОК
Интенсивность очистки масла от нерастворимых примесей, г/ч : общих зольных	16 ± 2 20 ± 2	250 ± 20 330 ± 30	15 ± 1 24 ± 3	220 ± 20 430 ± 40	80 ± 20 110 ± 30	320 ± 40 580 ± 50
Интенсивность старения масла, %	100	76	100	62	100	64
Интенсивность срабатывания присадок, %	100	74	100	58	100	68
Срок службы ФЭ, тыс. ч	1,6 ± 0,2	2,5 ± 0,3	0,8 ± 0,2	1,6 ± 0,3	0,8 ± 0,2	1,4 ± 0,3
Скорость изнашивания деталей ДВС : поршневых колец, г/1000 ч цилиндровых втулок, мкм/1000 ч вкладышей мотылевых подшипников, мкм/1000 ч мотылевых шеек коленчатого вала, мкм/1000 ч	4,3 ± 0,5 13 ± 2 16 ± 2	2,6 ± 0,3 7 ± 1 8 ± 1	13 ± 2 14 ± 2 14 ± 2	8 ± 1 10 ± 1 11 ± 1	4,2 ± 0,5 22,3 ± 1,7 –	1,8 ± 0,2 9,4 ± 0,8 –
Нагаро- и лакообразование на поршнях (общая оценка), балл	8,4 ± 0,9	5,8 ± 0,6	10 ± 2	6 ± 1	5,1 ± 0,8	2,7 ± 0,3

Глубокая очистка масла от нерастворимых продуктов комбинированием фильтрования и центрифугирования в среднем на треть тормозит старение масла и срабатывание присадок. Самый высокий эффект в ослаблении катализирующего действия продуктов износа и срабатывания присадок на окисление масла обнаружен при интенсивном центрифугировании в дизеле 4ЧН22/24.

Новые комбинированные маслоочистительные комплексы по сравнению с ФТОМП уменьшают изнашивание основных деталей ДВС в 1,3 – 2 раза [5]. Центрифугирование масла способствует понижению скорости изнашивания как деталей цилиндропоршневой группы, так и кривошипно-шатунного механизма. Наибольшее воздействие МЦН-НС оказывает на маслосъёмные поршневые кольца: износ их уменьшается в 2,5 раза.

Увеличение полноты отсева нерастворимых примесей при комбинированной очистке масла уменьшает нагаро- и лакообразование в дизелях в 1,4 – 1,7 раза. При использовании КМОК загрязнения картера и отложений на элементах смазочной системы не наблюдалось.

Ухудшение технического состояния дизелей при недостаточно эффективной очистке моторного масла проявляется в её высоком угаре масла  $g_y$  в зависимости от отработано-ресурса  $t$  (Рис. 4).

Так, через 9 тыс. ч работы у рассматриваемых дизелей угар масла возрос в 2,5 раза при использовании ФТОМП, а в случае включения в систему смазки КМОК за более продолжительный период работы (12–15 тыс. ч) угар масла увеличивался лишь в 1,6 раза. Причем, исходя из допустимого угара масла, переборка дизелей с ФТОМП необходима через 7 – 9, а оборудованных новым маслоочистительным комплексом через 12–15 тыс. ч работы [7, 8].

Глубокая очистка масла не только способствует стабилизации его угара на низком уровне, но и позволяет сократить расход масла в среднем на 36 %. Такая экономия за период наработки дизелем 9 тыс. ч обусловлена меньшим угаром масла и замедлением его старения, что позволяет увеличить в 1,5 – 3 раза срок его службы.

За рассматриваемый эксплуатационный период ухудшение технического состояния дизелей, оборудованных ФТОМП, выразилось в увеличении на 8 – 10 % расхода топлива. В то же время у контрольных ДВС с КМОК расход топлива остался практически без изменения и соответствовал экономичности нового дизеля (сравнение осуществлялось при одинаковом состоянии и регулировке топливной аппаратуры).



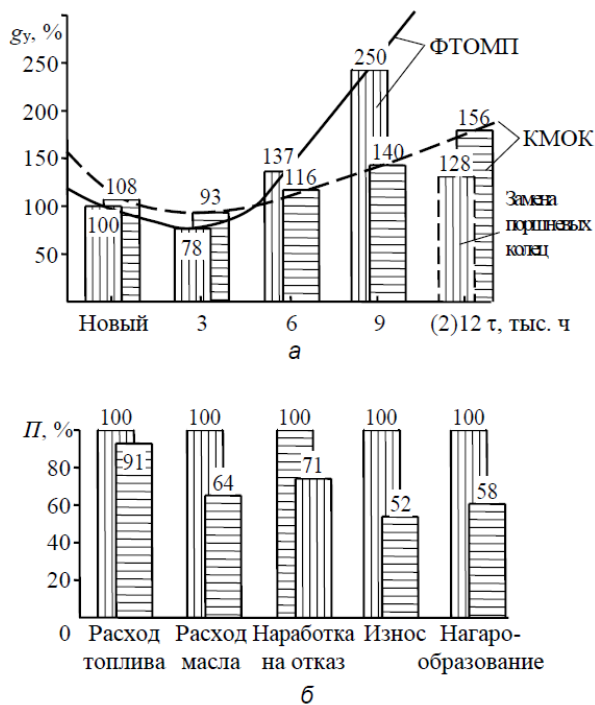


Рис. 4. Динамика угара масла в дизелях с разными системами его очистки (а) и влияние маслоочистителей на экономичность и техническое состояние ДВС (б)

К моменту отработки 9 – 12 тыс. ч у дизелей с комбинированной очисткой наработка на отказ по деталям цилиндра-поршневой группы (см. показатель П рис. 4,б) была в 1,4 раза больше, средний износ и нагаро- и лакообразование у группы дизелей с КМОК на 42 – 48 % меньше, чем у двигателей, оборудованных только ФТОМП.

Оценка ДВС по результатам длительных эксплуатационных испытаний показала возможность

увеличения их ресурсных показателей не менее, чем на 25% в случае использования унифицированных судовых масел и комбинированных маслоочистительных комплексов. При этом продолжительность их безвахтенной работы (по системе смазки) может быть доведена до 1,5 – 2,5, периодичность моточисток – до 12–15 тыс. ч, расход сменно-запасных частей и трудоемкость обслуживания ДВС уменьшены на 20 – 35 %.

### Выводы

1. Для судовых форсированных дизелей средней ( $N_e < 5$  тыс. кВт) мощности создана система комбинированной тонкой очистки моторного масла повышенной эффективности с ресурсом непрерывной работы 1,5 – 2,5 тыс. ч и трудоемкостью обслуживания 2 – 4 чел.-ч на тысячу часов работы. Применение её в ДВС последнего поколения по сравнению с распространенными системами в 1,3 – 1,6 раза замедляет старение масла, в 1,5 – 3 раза увеличивает срок его слух и стабилизирует угар в течение 8 – 12 тыс. ч на уровне 1–2 г/(кВт ч), уменьшает изнашивание основных деталей нагаро- и лакообразование двигателей в 1,3 – 2 раза.

2. Реализация в судовых тронковых дизелях с высоким наддувом новых комбинированных маслоочистительных комплексов дает возможность сократить эксплуатационный расход топлива на 8 – 10, моторного масла – на 25 – 50 %, фильтрующих элементов в среднем в 2 раза и повысить ресурсные показатели ДВС не менее чем на 25 %.

3. Экономичная ресурсосохраняющая эксплуатация форсированных ДВС обеспечивается надежной защитой их от абразивного изнашивания и углеродистых отложений, торможения старения масла, что достигнуто за счет постоянного в широком диапазоне температурных (системы смазки) и скоростных (дизеля) режимов полно-поточного фильтрования и глубокой очистки его от нерастворимых тонкодисперсных примесей центрифугированием.

### Литература

1. Кича Г.П., Надёжкин А.В., Глушков С.В. Комплексное системное решение проблемы ресурсосберегающего маслоиспользования в судовых дизелях // Морские интеллектуальные технологии. 2016. № 3. Т.1. С. 118–126.
2. Кича, Г.П., Полоротов С.П. Экспериментальное моделирование процесса изнашивания ДВС в условиях полнопоточного фильтрования масла // Трение и износ. 1982. № 2. Т. 3. С. 290–298.
3. Кича Г.П., Перминов Б.Н., Надёжкин А.В. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях: монография. Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2011. 372 с.
4. Надёжкин А.В., Кича Г.П., Семенюк Л.А. Оптимизация режимов комбинированной очистки моторного масла в судовых дизелях методами вариационного исчисления // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 3, Т. 2. С. 93–101.
5. Кича Г.П., Семенюк Л.А. Полнопоточная комбинированная фильтрованием и центрифугированием тонкая очистка моторного масла в судовых дизелях // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2018. №1. С. 62–69.
6. Кича Г.П., Семенюк Л.А., Кича П.П. Кинетика загрязнения и комбинированной очистки моторного масла фильтрованием и центрифугированием в дизелях // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2018. № 1. С. 87–94.
7. Kicha G.P., Lipin G.M., Polorotov S.P. Tribotechnical charec teristics of insoluble motor oil contanmination products and their influence on engine // Soviet journal of Friction and Wear (English translation of Trenie i iznos). 1986. Vol. 7. № 6. P. 1068–1078.
8. Kicha G.P. Oil cleaning in inernal combustion engine // Gremisty and Technology of Fuels and Oils. 1985. № 2. P. 28–30.

## References

1. Kicha G.P., Nadezhkin A.V., Glushkov S.V. Kompleksnoe sistemnoe reshenie problemy resursosberegajushhego masloispol'zovanija v sudovyh dizeljah // Morskie intellektual'nye tehnologii. 2016. – № 3(33), T. 1. S. 118–126.
2. Kicha, G.P., Polorotov S.P. Jeksperimental'noe modelirovanie processa iznashivaniya DVS v uslovijah polnopotochnogo fil'trovaniya masla // Trenie i iznos. – 1982. – T. 3. –№ 2. – S. 290–298.
3. Kicha G.P., Perminov B.N., Nadezhkin A.V. Resursosberegajushhee masloispol'zovanie v sudovyh dizeljah: monografija. Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2011. 372 s.
4. Nadjozhkin A.V., Kicha G.P., Semeniuk L.A. Optimizacija rezhimov kombinirovannoj ochistki motornogo masla v sudovyh dizeljah metodami variacionnogo ischislenija // Morskie intellektual'nye tehnologii. – № 3. – 2017. – S. 93–101.
5. Kicha G.P., Semeniuk L.A. Polnopotochnaja kombinirovannaja fil'trovaniem i centrifugirovanijem tonkaja ochistka motornogo masla v sudovyh dizeljah // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: Morskaja tehnika i tehnologija. - Astrahan', 2018. –№ 1. – S. 62-69.
6. Kicha, G.P., Semeniuk L.A., Kicha P.P. Kinetika zagrjaznenija i kombinirovannoj ochistki motornogo masla fil'trovaniem i centrifugirovanijem v dizeljah // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. – № 1. – 2018. S. 87–94.
7. Kicha G.P., Lipin G.M., Polorotov S.P. Tribotechnical charec teristics of insoluble motor oil contanmination products and their influence on engine // Soviet journal of Friction and Wear (English translation of Trenie i iznos). 1986. Vol. 7. № 6. P. 1068–1078.
8. Kicha G.P. Oil cleaning in inrernal combustion engine // Gremisty and Technology of Fuels and Oils. 1985. № 2. P. 28–30.



УДК 621.431.78/74.04

## РАСЧЁТ ТЕПЛОЁМКОСТИ ЗАРЯДА СЖАТИЯ В ЦИЛИНДРЕ ДВИГАТЕЛЯ РАБОТАЮЩЕГО НА ГАЗОМОТОРНОМ ТОПЛИВЕ

**Анатолий Николаевич Соболенко**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Судовые двигатели внутреннего сгорания  
Морской государственной университет им. адм. Г.И Невельского  
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а  
тел.: 8 (950) 286-57-03; e-mail: sobolenko\_a@mail.ru

**Анатолий Иванович Самсонов**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Судовой энергетики и автоматики  
Дальневосточный федеральный университет  
690091, Владивосток, ул. Суханова. 8  
e-mail: aicam@mail.ru

### Аннотация

Цель статьи – проанализировать влияние на значение теплоёмкости наличия доли природного газа в воздушном заряде в цилиндре дизеля на такте сжатия при использовании газомоторного топлива. Существуют зависимости для расчёта теплоёмкости параметров газа в цилиндре дизеля при работе на жидком топливе, но для дизелей работающих на газомоторном топливе их нет. Для компонентов природного газа, включающего в себя метан, пропан, бутан, этилен, угарный газ, азот и др., определены уравнения описывающие зависимость их теплоёмкости от температуры. В качестве уравнений принята линейная зависимость теплоёмкости от температуры. На такте сжатия двигателя работающего на газомоторном топливе в цилиндре сжимается не смесь чистого воздуха и остаточных газов, а смесь, состоящая из воздуха, остаточных газов и природного газа. На основании зависимостей теплоёмкости от температуры для воздуха, остаточных газов и природного газа определены уравнения зависимостей теплоёмкости от температуры для смеси заряда воздуха в цилиндре, включающей в себя воздух, остаточные газы и природный газ. В результате выполненного анализа показано, что в количественном отношении доля природного газа может в 2,5 раза превышать долю остаточных газов.

**Ключевые слова:** теплоёмкость, природный газ, сжатие, дизель, газомоторное топливо

## CALCULATION OF THE HEAT CAPACITY OF THE COMPRESSION CHARGE IN THE CYLINDER OF ENGINE OPERATING GAS MODE

**Anatoly N. Sobolenko**

Professor, Dr.Sci.Tech.,  
Professor of department of Ship power installations,  
Maritime state university named Admiral Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: 8 (950) 286-57-03; e-mail: sobolenko\_a@mail.ru

**Anatoly I. Samsonov**

Professor, Dr.Sci.Tech.,  
Professor of Ship energetic and automatics department,  
Far Eastern Federal University  
8, Sukhanova st., 690091, Vladivostok, Russia  
e-mail: aicam@mail.ru

### Abstract

At the present time, more and more marine diesel engines operate in gas mode and gas mode with liquid fuel additive. In this connection, the improvement of the calculation methods of the working process of diesel engines operating in gas mode becomes important. At the compression stroke of the engine running in gas mode a mixture of air, residual gases and natural gas is compressed in the cylinder. Moreover, natural gas includes a number of gases - methane, ethane, propane, carbon monoxide, etc. Determination of the specific heat of the fresh charge was carried out according to the usual equation for the gas mixture heat capacity. In thermal calculations the true law of the average specific heat dependence on temperature is replaced by an approximate dependence on the line form. A similar dependence can approximate to the laws of variation of the specific heat for charge components. For natural gas components the formulas were obtained. The share of natural gas in the air charge under compression can be more than 2,5 times greater than the fraction of residual gases. This circumstance has a noticeable effect on the power and economy of the engine. Therefore, it is necessary to keep the calculation of the working cycle and the analysis of processes in it taking into account the presence of natural gas in the mixture, along with the residual gases.

**Key words:** heat capacity, natural gas, compression, diesel, gas fuel

**Введение**

В существующей литературе приведены выражения для расчёта теплоёмкостей в характерных точках цикла дизелей работающих на жидком топливе [1, 2]. В последнее время всё более широкое применение находят судовые дизели, работающие на газовом топливе и на газовом топливе с присадкой жидкого топлива. Это, как правило, главные дизели судов-газовозов [3]. Вновь вводимые требования Международной морской организации (ИМО) по ограничению выбросов сернистых соединений в атмосферу на акваториях портов. Применение газового топлива, как экологически более чистого топлива, позволит решить эту проблему на судах портового флота [3].

К настоящему времени рядом зарубежных фирм и российских дизелестроительных заводов созданы двигатели с системами топливоподачи сжиженного природного газа.

В этих системах сжиженный природный газ при подаче к двигателю вначале преобразовывался в газообразное состояние, а затем смешивался с воздухом в газоздушном миксере, установленном во впускном трубопроводе. Таким образом, осуществлялось внешнее смесеобразование. Внешнее смесеобразование осуществлялось в специальных смесительных устройствах - миксерах, обеспечивающих необходимый состав смеси на всех режимах. При таком способе смесеобразования в цилиндре четырёхтактного дизеля происходит сжатие рабочей смеси, состоящей из воздуха, остаточных газов и природного газа.

В этой связи приобретает значение уточнение расчётных методов рабочего процесса дизелей работающих на газомоторном топливе [4]. В данной статье приводятся результаты и выводы по расчётным значениям теплоёмкости для процесса сжатия, когда газовое топливо подаётся на всасывание четырёхтактного дизеля.

**1. Методика расчёта коэффициентов уравнения теплоёмкости**

На такте сжатия двигателя работающего на газомоторном топливе в цилиндре сжимается не смесь чистого воздуха и остаточных газов, а смесь, состоящая из воздуха, остаточных газов и природного газа. Причём природный газ включает в себя ряд газов - метан, этилен, пропан, окись углерода и др. В зависимости от месторождения процентное соотношение между компонентами газа различается, но преобладающим является количество метана, более 93 % .

Определение теплоёмкости свежего заряда производится по обычному уравнению теплоёмкости смеси газов [5]

$$c_v = \sum r_k c_{vk}, \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{град)}, \tag{1}$$

где  $r_k$  – объёмная доля компонента;  
 $c_{vk}$  – теплоёмкость компонента.

Тогда при содержании в газообразном топливе X долей от объёмной единицы газа, объёмная доля этого компонента

$$r_X = \frac{X}{1 + \alpha L_0}, \tag{2}$$

где  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха для сгорания топлива;  $L_0$  – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания газомоторного топлива.

В тепловых расчётах истинный закон изменения средней теплоёмкости заменяют приближенной зависимостью вида

$$c = a + bT. \tag{3}$$

Тогда с учётом формулы (1) коэффициенты в формуле (3) определяются по зависимостям

$$a_k = \sum r_k a_{ki}; \tag{4}$$

$$b_k = \sum r_k b_{ki}, \tag{5}$$

где  $r_k$  – объёмная доля компонента;  $a_{ki}, b_{ki}$  – численные коэффициенты в формулах теплоёмкостей компонентов.

Аналогичной зависимостью можно аппроксимировать законы изменения теплоёмкости для компонентов воздушного заряда.

**2. Расчёт коэффициентов уравнения теплоёмкости газов в цилиндре дизеля**

Рассмотрим процесс сжатия при использовании природного газа следующего состава: метан  $r_{CH_4} = 93\%$ ; этилен  $r_{C_2H_4} = 3,5\%$ ; пропан  $r_{C_3H_8} = 1,5\%$ ; бутан  $r_{C_4H_{10}} = 1\%$ ; азот  $r_{N_2} = 0,5\%$ ; углекислый газ  $r_{CO_2} = 0,5\%$  [6] ( $r$  – объёмная доля компонента).

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания газового топлива при нормальных условиях, кмоль/кмоль [2, 5]

$$L_0^r = 4,76 \cdot [0,5 \cdot (CO + H_2) + \sum (n + 0,25m) C_n H_m + 2CH_4 - O_2],$$

$$L_0^r = 4,76 [0,5 \cdot 0 + (1 + 0,25 \cdot 4) \cdot 0,93 + (2 + 0,25 \cdot 4) \cdot 0,035 + (3 + 0,25 \cdot 8) \cdot 0,015 + (4 + 0,25 \cdot 10) \cdot 0,01] = 9,869. \tag{6}$$

Теоретически необходимое количество воздуха для сгорания жидкого топлива среднего состава, кмоль/кг

$$L_0^{*k} = \frac{1}{0,21} \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} + \frac{S}{32} \right); \tag{7}$$

$$L_0^{*k} = \left( \frac{0,87}{12} + \frac{0,126}{4} - \frac{0,004}{32} \right) = 0,495$$

Теоретически необходимое количество воздуха для газового топлива с подачей запального жидкого топлива, кмоль/кмоль

$$L_0 = L_0^r + bL_0^{*k}, = 9,869 + 2,2 \cdot 0,495 = 11,0, \tag{8}$$

где  $b = 2,2$  – кг/кмоль – количество запального жидкого топлива на киломоль газа, что будет соответствовать 8% от расхода топлива при работе только на дизельном топливе.

Для компонентов природного газа с использованием данных таблиц, приведённых в работе [3] получены следующие формулы, кДж/(кмоль·К):

метан (CH<sub>4</sub>):  
 $c_{vCH_4} = a_{vCH_4} + b_{CH_4} T = 21,4226 + 0,0508 \cdot T;$

этилен (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>):  
 $c_{vC_2H_4} = a_{vC_2H_4} + b_{C_2H_4} T = 33,529 + 0,0912 \cdot T;$

пропан (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>):

$$c_{vC_3H_8} = a_{vC_2H_8} + b_{C_2H_4} T = 43,6974194 + 0,13156 \cdot T;$$

бутан (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>):

$$c_{vC_4H_{10}} = a_{vC_4H_{10}} + b_{C_4H_{10}} T = 54,211 + 0,1719 \cdot T;$$

азот (N<sub>2</sub>):

$$c_{vN_2} = a_{vN_2} + b_{N_2} T = 20,622 + 0,0033 \cdot T;$$

углекислый газ (CO<sub>2</sub>):

$$c_{vCO_2} = a_{vCO_2} + b_{CO_2} T = 34,702 + 0,00808 \cdot T;$$

окись углерода (CO):

$$c_{vCO} = a_{vCO} + b_{CO} T = 20,9744 + 0,0032818 \cdot T.$$

Для определения численных значений для природного газа в формуле (3) определим значения  $a_v$  и  $b_v$  по формуле (1)

$$\begin{aligned} a_{vп.г} &= a_{vCH_4} r_{CH_4} + a_{vC_2H_6} r_{C_2H_6} + a_{vC_3H_8} r_{C_3H_8} + a_{vC_4H_{10}} r_{C_4H_{10}} = \\ &= 21,98387 \cdot 0,93 + 33,529 \cdot 0,035 + 43,697 \cdot 0,015 + \\ &+ 54,211 \cdot 0,01 + 20,622 \cdot 0,005 + 34,702 \cdot 0,005 = 23,1; \quad (9) \\ b_{п.г} &= b_{CH_4} r_{CH_4} + b_{C_2H_6} r_{C_2H_6} + b_{C_3H_8} r_{C_3H_8} + b_{C_4H_{10}} r_{C_4H_{10}} = \\ &= 0,0508 \cdot 0,93 + 0,0912 \cdot 0,035 + 0,13156 \cdot 0,015 + \\ &+ 0,1719 \cdot 0,01 + 0,0033 \cdot 0,005 + 0,00808 \cdot 0,005 = 0,054. \quad (10) \end{aligned}$$

Таким образом, для природного газа выбранного состава зависимость средней теплоёмкости от температуры имеет вид

$$c_{vп.г} = 22,1 + 0,054 T. \quad (11)$$

Для воздуха зависимость средней теплоёмкости от температуры имеет вид [1]

$$c_{vвозд} = 19,26 + 0,0025 T. \quad (12)$$

Для «чистых» продуктов сгорания углеводородного топлива зависимость средней теплоёмкости от температуры имеет вид [1]

$$c_{vпрод. сг} = 20,47 + 0,0036 T. \quad (13)$$

Значения коэффициентов в формуле средней мольной теплоёмкости для смеси воздуха и остаточных газов на ходе сжатия для принятых параметров определим по известным формула [1]

$$a_{vc} = \frac{\gamma_r \cdot 20,47 + [\alpha(1+\gamma_r) - \gamma_r] \cdot 19,26}{\alpha(1+\gamma_r)}, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} a_{vc} &= \frac{0,04 \cdot 20,47 + [1,5(1+0,04) - 0,04] \cdot 19,26}{1,5(1+0,04)} = 19,29 \\ b_{vc} &= \frac{\gamma_r \cdot 0,0036 + [\alpha(1+\gamma_r) - \gamma_r] \cdot 0,0025}{\alpha(1+\gamma_r)}, \quad (15) \end{aligned}$$

$$a_{vc} = \frac{0,04 \cdot 0,0036 + [1,5(1+0,04) - 0,04] \cdot 0,0025}{1,5(1+0,04)} = 0,00252.$$

$$c_{vвозд+ост. г} = 19,29 + 0,00252 T. \quad (16)$$

В цилиндре двигателя при сжатии газовая смесь состоит из чистого воздуха, природного газа и остаточных газов.

Теплоёмкость смеси для произвольного момента сжатия определится следующим образом.

Так как количество остаточных газов в цилиндре невелико, можно принять, что они состоят из  $M_r / \alpha$  «чистых» продуктов сгорания и  $M_r (1 - 1/\alpha)$  свежего воздуха [1]. Тогда в произвольный момент сжатия общее количество «чистых» продуктов сгорания на 1 кмоль сжигаемого топлива будет равно

$$L_r = \frac{M_r}{\alpha} = L_0 \gamma_r, \quad (17)$$

где  $M_r$  – количество остаточных газов, кмоль;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха для сгорания топлива;  $\gamma_r$  – коэффициент остаточных газов

Для принятых параметров процесса

$$L_r = 11 \cdot 0,04 = 0,44 \text{ кмоль}. \quad (18)$$

Количество свежего воздуха в тот же момент времени

$$L_{св} = \alpha L_0 + M_r - \frac{M_r}{\alpha} = L_0 [\alpha(1 + \gamma_r) - \gamma_r] \text{ кмоль}. \quad (19)$$

Для принятых параметров процесса

$$L_{св} = 11(1,5(1 + 0,04) - 0,04) = 16,72 \text{ кмоль}. \quad (20)$$

Количество природного газа

$$L_{п.г} = 1 \text{ кмоль}.$$

Общее количество заряда, кмоль

$$L = L_0 [\alpha(1 + \gamma_r) - \gamma_r] + \gamma_r L_0 + L_{п.г}. \quad (21)$$

Для принятых параметров процесса

$$L = 11[1,5(1+0,04)-0,04]+0,04 \cdot 11+1=18,16 \text{ кмоль}. \quad (22)$$

Доля чистого воздуха

$$r_{возд} = \frac{L_{св}}{L}. \quad (23)$$

Доля чистых продуктов сгорания

$$r_{прод. сг} = \frac{L_r}{L}. \quad (24)$$

Доля природного газа

$$r_{газ} = \frac{L_{п.г}}{L}. \quad (25)$$

Для принятых параметров рабочего процесса и газа

$$r_{возд} = \frac{L_{св}}{L} = \frac{16,72}{18,16} = 0,92. \quad (26)$$

$$r_{сг} = \frac{L_r}{L} = \frac{0,44}{18,16} = 0,024. \quad (27)$$

$$r_{газ} = \frac{1}{L} = \frac{1}{18,16} = 0,056. \quad (28)$$

Значения коэффициентов в формуле теплоёмкости (6)

$$\begin{aligned} a_{vзаряда} &= r_{возд} a_{vвозд} + r_{прод. сг} a_{vпрод. сг} + r_{газ} a_{vгаз} = \\ &= 0,92 \cdot 19,26 + 0,024 \cdot 20,47 + 0,056 \cdot 23,1 = 19,5. \quad (29) \end{aligned}$$

Таблица 1

Сравнение параметров процесса сжатия  
обычного и газового двигателя

Тип двигателя	$c_{va},$ кДж/ кмоль·К	$c_{vc},$ кДж/ кмоль·К	$n_1$	$p_c,$ МПа	$T_c,$ К
Работающий на жидком топливе	20,04	21,265	1,377	3,42	784
Работающий на газомоторном топливе	21,12	23,312	1,334	3,06	706

$$b_{v_{заряда}} = r_{возд} b_{v_{возд}} + r_{прод.ст} b_{v_{прод.ст}} + r_{газ} b_{a_{v_{газ}}} = 0,92 \cdot 0,0025 + 0,024 \cdot 0,0036 + 0,054 \cdot 0,056 = 0,0054. \quad (30)$$

Тогда расчётная формула для расчёта теплоёмкости смеси заряда в процессе сжатия в этом случае имеет следующий вид

$$c_{vсж} = 19,5 + 0,0054 \cdot T. \quad (31)$$

Параметры процесса сжатия были рассчитаны по известным формулам для политропного процесса [1] и приведены в табл. 1 для точек в начале сжатия (точка а) и в конце сжатия (точка с).

Значение показателя политропы сжатия определялось из следующей формулы [1]

$$n_1 - 1 = \frac{8,315}{a_{vc} + b_c T_a (1 + \epsilon^{n_1 - 1})}; \quad (32)$$

Значения параметров конца сжатия определялись по следующим формулам [1]

$$p_c = p_a \epsilon^{n_1}; \quad (33)$$

$$T_c = T_a \epsilon^{n_1 - 1}, \quad (34)$$

где  $p_a = 0,1$  МПа – давление в начале сжатия;  $T_a = 300$  К – температура в начале сжатия;  $p_c$  – давление в конце сжатия, МПа;  $T_c$  – температура в конце сжатия, К;  $n_1$  – показатель политропы сжатия.

Как следует из табл. 1 значения теплоёмкости в начале сжатия ( $c_{va}$ ) и конце сжатия ( $c_{vc}$ ) для двигателя работающем на жидком топливе меньше на 5,3÷9,6%, чем у двигателя, работающего на газомоторном топливе. Значения параметров в конце сжатия ( $p_c, T_c$ ) отличаются на 10,5%.

**Заключение**

Доля природного газа в воздушном заряде при сжатии может более чем в 2,5 раза превосходить долю остаточных газов. Это обстоятельство влияет на параметры процесса сжатия. Поэтому расчет рабочего цикла и анализ процессов для четырёхтактного газового двигателя с внешним смесеобразованием необходимо вести с учетом наличия в составе смеси в цилиндре природного газа, наряду с остаточными газами.

**Литература**

1. Ваншейдт В.А. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Л.: Судостроение, 1977. 390 с.
2. Дизели. Справочник. По ред. В.А. Ваншейдта, Н.Н. Иванченко, Л.К. Коллерова. Л.: Машиностроение. 1977, 480 с.
3. Соболенко А.Н., Воробьев Б.Н. Проблемы внедрения газомоторного топлива в судовых дизелях. Научные труды Дальрыбвтуза, № 1 (т. 44), Владивосток: Дальрыбвтуз, 2018 г. с. 73-78.
4. Соболенко А.Н., Воробьев Б.Н. Об организации рабочего процесса при использовании газомоторного топлива в судовых дизелях. Проблемы транспорта Дальнего Востока. Доклады двенадцатой международной научно-практической конференции. 18–20 октября 2017 г. Владивосток: ДВО Российской Академии транспорта, 2017. С. 60-64.
5. Кираковский Н.Ф. Стационарные газовые двигатели. Киев – М. Машгиз. 1953 г. 280 с.
6. Гайворонский А.И., Марков В.А., Илатовский Ю.В. Использование природного газа и других альтернативных топлив в дизельных двигателях. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007. 480 с.
7. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. М.: Машиностроение, 1973. 344 с.

**References**

1. Vanshejdt V.A. Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya. L.: Sudostroenie, 1977. 390 s.
2. Dizeli. Spravochnik. Pod red. V.A. Vanshejdta, N.N. Ivanchenko, L.K. Kollerova. L.: Mashinostroenie. 1977, 480 s.
3. Sobolenko A.N., Vorob'ev B.N. Problemy vnedreniya gazomotornogo topliva v sudovyh dizelyah. Nauchnye trudy Dal'rybvtuza, № 1 (t. 44), Vladivostok: Dal'rybvtuz, 2018 g. s. 73-78.
4. Sobolenko A.N., Vorob'yov B.N. Ob organizacii rabochego processa pri ispol'zovanii gazomotornogo topliva v sudovyh dizelyah. Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Doklady dvenadcatoy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. 18–20 Oktyabrya 2017 g. Vladivostok: DVO Rossijskoj Akademii transporta, 2017. S. 60-64.
5. Kirakovskij N.F. Stacionarnye gazovye dvigateli. Kiev – M. Mashgiz. 1953 g. 280 s.
6. Gajvoronskij A.I., Markov V.A., Ilatovskij YU.V. Ispol'zovanie prirodnogo gaza i drugih al'ternativnyh topliv v dizel'nyh dvigatelyah. – M.: ООО «IRC Gazprom», 2007. 480 s.
7. Rabinovich O.M. Sbornik zadach po tekhnicheskoy termodinamike. M.: Mashinostroenie, 1973. 344 s.

УДК 629.127 (621.165:621.438)

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ ОСЕВОЙ МАЛОРАСХОДНОЙ ТУРБИНЫ С ЧАСТИЧНЫМ ОБЛОПАЧИВАНИЕМ РАБОЧЕГО КОЛЕСА

**Рафаиль Равильевич Симашов**

кандидат технических наук, доцент  
доцент кафедры Судовых энергетических установок  
Дальневосточный государственный технический  
рыбохозяйственный университет  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52 - Б  
тел. +7(902)529-91-71, e-mail: forsimashov@yandex.ru

**Сергей Валентинович Чехранов**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Судовых энергетических установок  
Дальневосточный государственный технический  
рыбохозяйственный университет  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52 - Б  
тел +7914 6556682, e-mail: turboroom@yandex.ru

### Аннотация

Изложены основы математической модели газодинамических процессов в проточной части осевой двухступенчатой малорасходной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса, на базе прямой задачи турбинной ступени в квазиодномерной постановке. Математическая модель представляет собой двухуровневую иерархическую структуру, состоящую из отдельных блоков, в которых описываются элементарные процессы в элементах проточной части с привлечением обобщенных результатов физического моделирования. На верхнем иерархическом уровне решается система нелинейных трансцендентных уравнений, описывающих течение потока в межвенцовых зазорах. На нижнем иерархическом уровне решаются балансовые уравнения расхода в камерах, представляющих собой щелевые пространства между корпусом и элементами ротора. Такое построение модели позволяет рассчитать подсосы и утечки рабочего тела в межвенцовом зазоре и определить параметры смещения потоков, а также потери кинетической энергии в элементах ступени. Предложенная структура модели позволяет до минимума свести необходимый для расчетов экспериментальный материал за счет более детального учета фактической геометрии ступени, потока рабочего тела и процессов, протекающих в осевых зазорах. Выполненный анализ адекватности модели по результатам экспериментальных исследований в широком диапазоне изменения геометрических и режимных параметров показал удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений внутреннего к.п.д.

**Ключевые слова:** сверхзвуковые малорасходные турбины, степень парциальности, математическая модель, осевая турбина, многорежимность, оптимизация

## MATHEMATICAL MODEL OF TWO-STAGE AXIAL-FLOW LOW-CONSUMPTION TURBINE WITH FRACTIONAL BLADING OF THE ROTOR WHEEL

**Rafail R. Simashov**

Associate professor, Cand. Sci. Tech.  
Associate professor of Department of Marine Power Systems  
Far Eastern State Technical Fisheries University  
52-B, Lugovaya str., 690087, Vladivostok, Russia  
tel. +7(902)529-91-71, e-mail: forsimashov@yandex.ru

**Sergei V. Chekhranov**

Professor, Dr. Sci. Tech.  
Professor of Department of Marine Power Systems  
Far Eastern State Technical Fisheries University  
52-B, Lugovaya str., 690087, Vladivostok, Russia  
tel +7914 6556682, e-mail: turboroom@yandex.ru

### Abstract

The foundations of a mathematical model of gas-dynamic processes in the flow channel of an axial-flow two-stage low-consumption turbine with fractional blading of the rotor wheel, based on the direct problem of the turbine stage in a quasi-one-dimensional system are stated. The mathematical model is a two-level hierarchical structure consisting of separate blocks, in which elementary processes in the elements of the flow channel are described with the use of generalized results of physical modeling. At the upper hierarchical level, a system of nonlinear transcendental equations describing the flux creep in the rim clearance, is solved. At the lower hierarchical level, balance flow equations in the chambers, which are the slot spaces between the body and the rotor elements, are solved. This construction of the model

makes it possible to calculate the suction and leakage of the actuation fluid in the rim clearance and determine the parameters of the flows mixing, as well as the loss of kinetic energy in the elements of the stage. The proposed structure of the model makes it possible to minimize the experimental material necessary for calculations due to a more detailed account of the actual geometry of the stage, the flow of the actuation fluid and the processes taking place in the axial end clearances. The performed analysis of the adequacy of the model based on the results of experimental studies in a wide range of changes in geometric and operating conditions has showed a satisfactory coincidence of the calculated and experimental values of the internal coefficient of efficiency.

**Key words:** supersonic low-consumption turbines, admission intensity, mathematical model, axial-flow turbine, multiplicity of operating levels, optimization

### Введение

Поиск оптимального варианта проточной части турбины с учетом ее свойств, как на номинальном, так и на переменном режимах не возможен без знания характеристик турбины на переменных режимах.

Математическая модель, отражающая поведение турбины на переменных режимах, должна соответствовать требуемому уровню сложности описания процесса.

Решение трехмерной прямой задачи требует значительных затрат машинного времени. Поэтому не потеряли своего значения расчеты характеристик турбин на переменных режимах в одномерной и двумерной постановке прямой задачи [1, 2].

Одномерный поверочный тепловой расчет на сегодняшний момент разработан достаточно полно. Об этом свидетельствует большое количество публикаций по этому вопросу [1 – 10], в которых представлены различные модификации одномерного расчета, приспособленные для решения различных вариантов прямой задачи.

В большинстве публикаций рассматривается поверочный расчет дозвуковых турбинных ступеней, предназначенный для расчета переменных режимов и проверочных расчетов, выполняемых для экспертной оценки проекта или с исследовательской целью [1, 3, 6, 7, 8].

Модификации поверочного расчета приспособленного для расчета переменных режимов в составе оптимизационной задачи [2, 9, 11], а также посвященных расчету переменных режимов сверхзвуковых МРТ [5, 10, 11] весьма немногочисленны.

Таким образом, представляется целесообразным создание математической модели переменного режима сверхзвуковой парциальной малорасходной турбины (МРТ) с частичным облопачиванием рабочего колеса, которая сочетала бы достоинства методик [2, 3, 7, 8] дозвукового проверочного расчета, учитывала особенности присущие рабочему процессу сверхзвуковой ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса и позволяла

использование ее в задачах многорежимной оптимизации МРТ (достаточная точность расчетов в широком диапазоне изменения конструктивных и режимных параметров) не приводя к непомерно большим затратам машинных ресурсов.

### 1. Математическая модель двухступенчатой осевой МРТ с частичным облопачиванием рабочего колеса

Конструкция осевой двухступенчатой реактивно - активной ступени, показанной на схеме (Рис. 1, здесь зазоры условно увеличены для обозначения параметров), обладает рядом особенностей.

Прежде всего, нужно отметить, что в отличие от известных двухступенчатых одновальных турбин здесь только один неподвижный направляющий аппарат при двух рабочих колесах.

Первое рабочее колесо облопачено лишь частично и представляет собой вращающийся сопловой аппарат (ВСА), иногда именуемый безлопаточной реактивной турбиной.

Второе рабочее колесо (РК) также облопачено лишь частично пропорционально длине дуги, занятой соплами на ВСА.

Между ними находится полностью облопаченный направляющий аппарат (НА). Развертка такой ступени показана на схеме (Рис.2, зазоры и каналы условно увеличены).

В качестве основных особенностей рассматриваемой турбины можно отметить поджатие потока перед соплами вследствие компрессорного эффекта в ВСА и интенсивные процессы смешения в зазорах между ВСА и НА и между НА и РК.

В экспериментальных турбинах за лабиринтным уплотнением входного участка ВСА в корпусе были выполнены 4 разгрузочных отверстия, обеспечивающие в заднем осевом зазоре ВСА давление, близкое к атмосферному.

Особенности конструкции МРТ с ВСА и частичным облопачиванием РК вносят целый ряд физических отличий течения потока в межлопаточных каналах и межвенцевых зазорах.



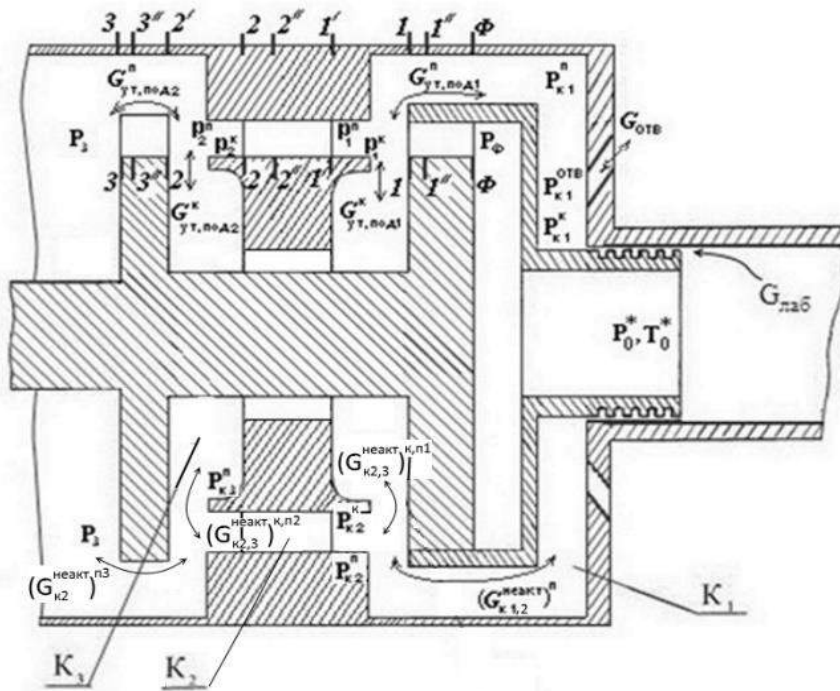


Рис. 1. Схема двухступенчатой осевой турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса:  
 $K_1$  – камера 1;  $K_2$  – камера 2;  $K_3$  – камера 3

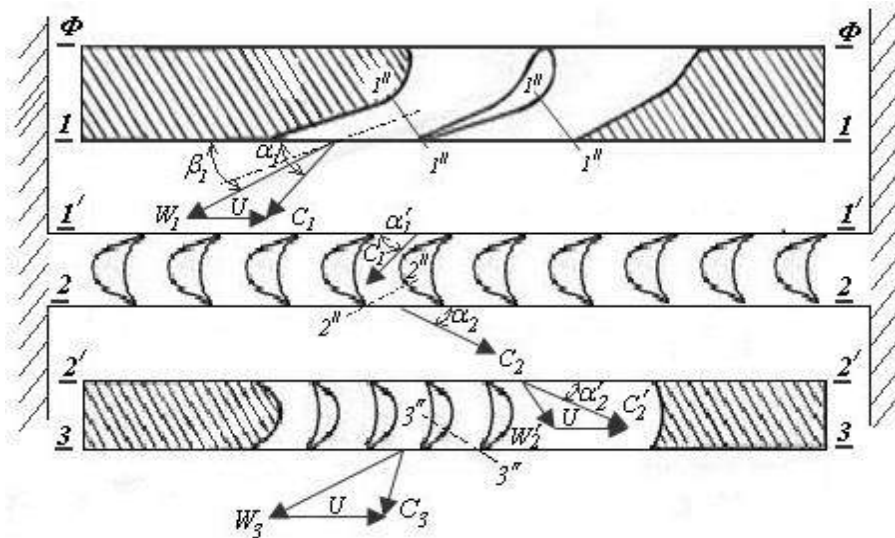


Рис. 2. Развертка двухступенчатой осевой турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса.  
 Показаны векторы скоростей с учетом утечек и смещения потоков в зазорах

Для МРТ существенно малых размеров ( $D_{ср} < 130$  мм) абсолютная величина зазоров соизмерима с размерами проходных сечений межлопаточных каналов. Следовательно, процессы подсоса и утечек, смещения потока в зазорах и др. оказывают существенное влияние на термодинамические и кинематические характеристики течения. Их неучет может привести к существенным искажениям оценки, как отдельных потерь, так и к.п.д. в целом.

В настоящей работе принят метод математического моделирования, уже

апробированный в некоторых работах, например, в [2, 11]. Основой метода является блочный подход к описанию элементов ступени и их иерархическая взаимосвязь.

Расчетная схема ступени, на которой базируется математическая модель, приведена на рис. 1 и 2. В соответствии с принятой схемой выделяются девять расчетных сечений: шесть основных и три дополнительных (обозначены двумя штрихами). Дополнительные сечения вводятся для определения угла отклонения потока на выходе из лопаток.

2. Структура модели

Структура модели включает в себя три основных блока.

1. Математические модели ВСА, РК и НА, имеющие постоянный расход от входного до выходного расчетного сечения и описываются общепринятыми уравнениями энергии, процесса, расхода, состояния совершенного газа. Они дополняются уравнениями угла выхода потока из направляющих и рабочих решеток с учетом потерь кинетической энергии:

$$\alpha_2 = \arcsin \left[ \frac{q(\lambda_{2p}) \sin \alpha_{2k}}{q(\lambda_2) \sigma_2} \right],$$

$$\beta_{1(3)} = \arcsin \left[ \frac{q(\lambda_{w1(3)p}) \sin \beta_{1(3)k}}{q(\lambda_{w1(3)}) \sigma_{1(3)}} \right],$$

где индексом р обозначены параметры потока в сечениях 1"-1", 2"-2", 3"-3".

2. Модель межвенцового зазора, где расход меняется от входа к выходу и происходят процессы смешения.

В зазорах происходит изменение параметров вдоль радиуса и не учёт этого изменения может привести к неверной оценке протечек через корневые и периферийные зазоры и степени реактивности ступени. Так как проточная часть МРТ выполняется с  $I_c / D_{cp} < 0.1$ , то давления в зазорах у корня и на периферии, необходимые для определения массы протечек, могут быть получены на основе расчета цилиндрической ступени (упрощенное уравнение радиального равновесия);

Для определения давлений в зазоре за ВСА  $P_1^k$ ,  $P_1^n$  и РК  $P_3^k$ ,  $P_3^n$  используются уравнения, представленные в работе [2]. Для применения их к ВСА в настоящей математической модели введены следующие дополнения в расчетную схему (Рис. 3.): перед вращающимися соплами располагается условный (гипотетический) неподвижный идеальный направляющий аппарат (ИНА), состоящий из профилей, угол выхода потока из которых  $\alpha_0$  (для каждого режима) определяется из условия обеспечения заданного геометрического угла входа в ВСА  $\beta_0$  при известных окружной  $u$  и относительной скорости  $w_0$  на входе в ВСА.

Тогда с учетом принятых дополнений уравнения из работы [2] для определения давления у корня ("к") и у периферии ("п") ВСА записываются в следующем виде (Рис. 3):

$$C_{1u}^{k,n} = C_{0u} \left( \frac{r_{cp}}{r_{k,n}} \right)^n - (C_{0u} - C_{1u}) \cdot \frac{r_{cp}}{r_{k,n}},$$

$$(C_{1z}^{k,n})^2 = C_1^2 - C_{0u}^2 \left[ \frac{n-1}{n} \left( \frac{r_{cp}}{r_{k,n}} \right)^{2n} + \frac{1}{n} \right] + 2C_{0u}(C_{0u} - C_{1u}) \cdot \left[ \frac{n-1}{n+1} \left( \frac{r_{cp}}{r_{k,n}} \right)^{n+1} + \frac{2}{n+1} \right] - (C_{0u} - C_{1u})^2,$$

$$P(r) = f(C(r)),$$

где  $n = \cos^2 \alpha_0$ , при  $\alpha_0(r)$ ,  $h_\phi^*(r)$ ,  $\phi_{BCA}(r)$ ,  $H_u^{BCA}(r) = \text{const}$ ,  $C_{1r} = 0$ .

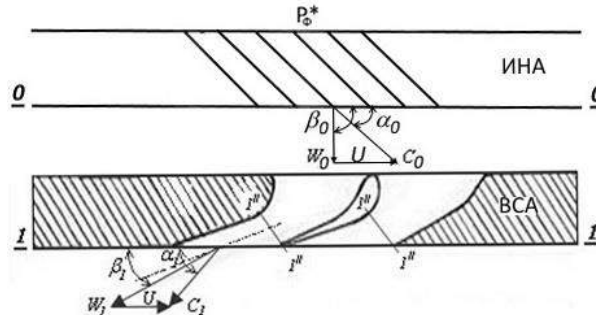


Рис. 3. Расчетная схема для определения давлений в зазоре на периферии и у корня ВСА

Протекающие в осевых зазорах процессы энерго- и массообмена приводят к изменению величины абсолютной скорости и угла потока перед кромками последующего венца. При моделировании этих процессов делаются следующие допущения: энергия и количество движения массы утечки полностью теряются и не совершают работы в ступени; процессы смешения считаются изобарными; параметры смеси в сечениях 1' и 2' «размазываются» по высоте венца (уравнение неразрывности).

В соответствии с расчетной схемой необходимо определить следующие параметры потока в сечениях 1', 2' -  $\alpha_{1(2)cm}$ ,  $C_{1(2)cm}$ ,  $G_{1(2)cm}$ ,  $h_{1(2)cm}$ .

Система уравнений для определения параметров в сечении 1' имеет вид:

- уравнение баланса расходов в общем виде:

$$(G_1 - G_{ym}) + G_{под} = G_{1cm},$$

- уравнение энергии в общем виде:

$$(G_1 - G_{ym}) \cdot \left( h_1 + \frac{C_1^2}{2} \right) + G_{под} \cdot \left( h_{под} + \frac{C_{под}^2}{2} \right) = G_{1cm} \cdot \left( h_{1cm} + \frac{C_{1cm}^2}{2} \right)$$

- уравнение сохранения количества движения:

$$(G_1 - G_{ym}) \cdot C_{1u} + G_{под} \cdot C_{у под} = G_{1cm} \cdot C_{1u cm}$$

- уравнение неразрывности в сечении 1':

$$G_{cm} = F'_1 \cdot C_{1z cm} \cdot \rho_{1cm},$$

- уравнения состояния:

$$P_1 / \rho_{1cm} = R \cdot T_{1cm}, \quad h_{1cm} = C_p \cdot T_{1cm},$$

- кинематические соотношения:

$$C_{1cm}^2 = C_{1u cm}^2 + C_{1z cm}^2,$$

$$\text{tg} \alpha_{1cm} = C_{1z cm} / C_{1u cm}.$$

Система уравнений содержит 8 неизвестных:

$$G_{CM}, \rho_{1CM}, T_{1CM}, h_{1CM}, C_{1CM}, C_{1UCM}, C_{1ZCM}, \alpha_{1CM}.$$

Решение системы уравнений сводится к квадратному уравнению относительно  $h_{1CM}$ .

Аналогично решается задача и для определения параметров потока в сечении 2'.

В заключении описания модели зазоров необходимо отметить, что энергия, вносимая массой подсосываемого рабочего тела (р.т.) в зазор, отнимается от ВСА (РК), поэтому при определении внутренней мощности МРТ нужно отнять мощность, затрачиваемую на закрутку массы подсосываемого рабочего тела:

$$\Delta N = -u \cdot C_{u под} G_{под}.$$

3. Модель протечек через периферийный и корневой зазоры. Задачу отыскания периферийных и корневых протечек в МРТ с частичным облопачиванием РК можно сформулировать следующим образом: известны давления и энтальпии на периферии и у корня ВСА (РК) и давление перед и за турбиной и параметры среды за разгрузочными отверстиями; требуется определить расходы рабочего тела через корневое и периферийное уплотнения на активной и неактивной дуге, а также через входное лабиринтное уплотнение и разгрузочные отверстия. Для этого необходимо решить уравнения баланса расходов, записанные для камер 1, 2 и 3 (Рис. 1).

Балансовые уравнения расходов для камер 1, 2 и 3 имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \pm G_{ут.под1}^n \pm (G_{к1,2}^{неакт})^n \pm G_{отв} \pm G_{лаб} &= 0, \\ \mp (G_{к1,2}^{неакт})^n \pm (G_{к2,3}^{неакт})^{к,п1} \pm \\ \pm (G_{к2,3}^{неакт})^{к,п2} \pm (G_{к2}^{неакт})^{п3} &= 0, \quad (1) \\ \pm G_{ут.под1}^к \mp (G_{к2,3}^{неакт})^{к,п1} \pm \\ \pm G_{ут.под2}^к \mp (G_{к2,3}^{неакт})^{к,п2} &= 0. \end{aligned}$$

где:  $G_{ут.под1}^n, (G_{к1,2}^{неакт})^n$  - соответственно, расход через периферийное уплотнение ВСА на активной и неактивной дуге;  $G_{лаб}, G_{отв}$  - соответственно, расход через лабиринтное уплотнение и разгрузочные отверстия;  $(G_{к2,3}^{неакт})^{к,п1}, (G_{к2,3}^{неакт})^{к,п2}, (G_{к2}^{неакт})^{п3}$  - соответственно, расход через корневое уплотнение в сечении 1 и 2 и через периферийное уплотнение РК на неактивной дуге;  $G_{ут.под1}^к, G_{ут.под2}^к$  - соответственно, расход через корневое уплотнение в сечении 1 и 2 на активной дуге.

Приведенные балансовые уравнения в камерах 1, 2 и 3 представляют собой единую систему нелинейных трансцендентных уравнений, которая решается относительно давлений,  $P_{к1}, P_{к2}$  и  $P_{к3}$ , поскольку изменение давлений в одной из камер влияет на весь баланс расходов в соседних камерах. Для ее решения использовался метод Зейделя с релаксацией, на каждой итерации которого

уравнения системы (1) решаются как уравнения с одним известным методом хорд - секущих относительно, соответственно, для камеры 1 -  $P_{к1}$ , камеры 2 -  $P_{к2}$ , камеры 3 -  $P_{к3}$ .

При определении расходов учитывается изменение давления по высоте камеры от вращения ВСА и РК (Рис. 1).

Расходы в балансовых уравнениях подставляются со своим знаком (" + ", если подсос в камеру, " - ", если утечка из камеры).

Использование для решения системы (1) метода Зейделя с релаксацией позволило повысить устойчивость решения при малых степенях парциальности ступени. Эмпирически установлено, что наиболее выгодное значение параметра релаксации при  $\varepsilon = 1$  равно 1, а при уменьшении  $\varepsilon$  параметр релаксации вырастает и лежит в пределах  $1 < \omega < 2$ .

Коэффициенты расхода в щелевом, лабиринтовом уплотнении и в разгрузочном отверстии определялись по представленным в работе [12] зависимостям и учитываются как направление движения рабочего тела, так геометрические и режимные параметры.

На базе изложенного был разработан алгоритм решения прямой задачи двухступенчатой МРТ с частичным облопачиванием РК. В качестве исходных внешних параметров принимаются  $P_0^*, T_0^*, P_3$  и частота вращения  $n_m$ . Решение прямой задачи сводится к подбору значений давлений  $P_1$  и  $P_2$  в осевых зазорах 1-1' и 2-2', которые бы обеспечивали решение системы основных уравнений баланса расходов в ступенях МРТ с частичным облопачиванием РК:

1-я ступень (зазор 1-1')

$$G_1 \mp G_{ут.под1}^n \mp G_{ут.под1}^к - G_2 = 0,$$

2-я ступень (зазор 2-2')

$$G_2 \mp G_{ут.под2}^n \mp G_{ут.под2}^к - G_3 = 0, \quad (2)$$

где  $G_1$  - расход р.т. через ВСА в сечении 1-1;  $G_2$  - расход р.т. через НА на активной дуге в сечении 2-2;  $G_3$  - расход р.т. через РК в сечении 3-3.

Решение системы уравнений (2) осуществлялось методом Зейделя, на каждой итерации которого уравнения системы (2) решались как уравнения с одним известным методом хорд - секущих относительно, соответственно, для зазора 1-1' -  $P_1$ , зазора 2-2' -  $P_2$ . На каждой итерации решение системы уравнений (2) находится решение системы уравнений (1). Такой подход позволяет повысить устойчивость решения задачи и обеспечить отыскание корней в области физической адекватности модели.

Потери кинетической энергии и коэффициенты расхода в элементах проточной части определяются в зависимости от геометрических и режимных параметров модели с помощью аппроксимационных зависимостей, полученных в результате обобщения

обширного экспериментального материала различных авторов (например [13]).

Для проверки адекватности математической модели были проведены расчеты турбин с частичным облопачиванием РК конструкция и

экспериментальные характеристики которых представлены в работе [14]. Некоторые результаты проведенного сравнительного исследования приведены на рис. 4.

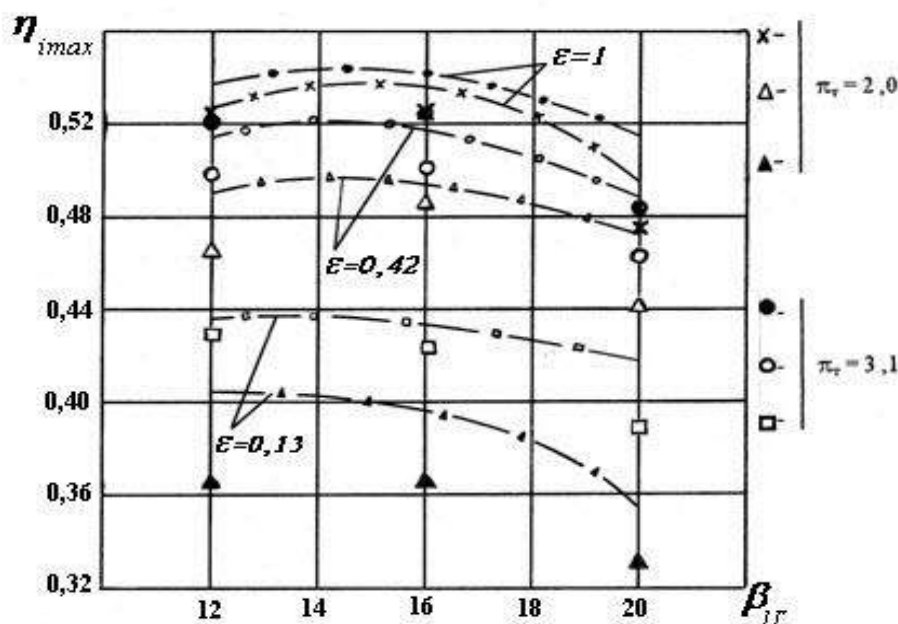


Рис. 4. Апробация математической модели по экспериментальным данным (расчетные кривые помечены значками, соответствующими сравниваемым экспериментальным данным)

Как следует из представленных на рис. 4 результатов сравнения расчетов и опытов можно утверждать, что математическая модель МРТ с частичным облопачиванием РК на переменных и расчетных режимах, основы которой изложены в данной статье, вполне удовлетворительно описывает характеристики реальных конструкций в широком диапазоне изменения геометрических и режимных параметров (расхождение между расчетом и экспериментом по внутреннему к.п.д. ступени не превышает 2,5 % и сопоставима с погрешностью эксперимента [14]) Модель может быть рекомендована к практическому использованию при степени парциальности  $\epsilon_{э\kappa\epsilon} \geq 0,1$ .

**Заключение**

Разработана математическая модель осевой МРТ с частичным облопачиванием рабочего колеса в виде двухуровневой иерархической структуры, состоящей из отдельных блоков, в которых описываются газодинамические процессы в

элементах проточной части с привлечением обобщенных результатов физического моделирования позволяющая определять характеристики турбин различной конструкции на переменных режимах при вариантных расчетах и многорежимной оптимизации.

Предложенная структура модели позволяет до минимума свести необходимый для расчетов экспериментальный материал за счет более детального учета фактической геометрии ступени, потока рабочего тела и процессов, протекающих в осевых зазорах.

Выполненный анализ адекватности модели по результатам экспериментальных исследований в широком диапазоне изменения геометрических и режимных параметров показал удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений внутреннего к.п.д., что позволяет использовать основные принципы и методологию построения данной модели для создания математических моделей других типов МРТ.

**Литература**

1. Жуковский Г.В., Марченко Ю.А., Тереньтьев И.К. Тепловые расчеты паровых и газовых турбин с помощью ЭВМ. Л.: Машиностроение, 1983. 255 с.
2. Лапшин К.Л. Оптимизация проточных частей многоступенчатых турбин. СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 1992. 196 с.
3. Заславский С.А., Либерман М.А., Симкин М.А., Сироткин Я.А. Одномерный проверочный расчет малоразмерных дозвуковых осевых газовых турбин на ЭВМ Энергомашиностроение. 1978. №7. С. 13-15.
4. Лапшин К.Л., Рисс В. К расчету осевых тепловых турбин на переменных режимах. Теплоэнергетика. 1992. №5. С. 64-66.

5. Овсянников Б.В., Уваров С.Е., Худенко Б.Г. Особенности расчета кпд активной парциальной газовой турбины при изменении противодавлений в широком диапазоне. Изв. вуз. Авиационная техника. 1990. №1. С. 66-70.
6. Самойлович Г.С., Трояновский Б.М. Переменные и переходные режимы в паровых турбинах. М.: Энергоиздат, 1982. 496 с.
7. Сироткин Я.А. Проверочный расчет многоступенчатых паровых турбин. Теплоэнергетика. 1982. №12. С. 21-24.
8. Сироткин Я.А. Одномерный проверочный аэродинамический расчет охлаждаемых газовых турбин. Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1980. №1. С.137-148.
9. Субботович В.П. Об оптимизации группы турбинных ступеней и решении прямой задачи расчета течения по среднему диаметру по единой вычислительной схеме. Энергетическое машиностроение. 1990. №49. С. 28-31.
10. Топунов А.М. Теория судовых турбин. Л.: Судостроение, 1985. 472 с.
11. Морозова Н.Т. Симашов Р.Р. Математическая модель малорасходной турбины на основе прямой задачи турбинной ступени. Вестник ТОГУ. 2015. №1(36). С. 133 – 140.
12. Симашов Р.Р., Чехранов С.В. Расчетная оценка коэффициентов расхода при моделировании переменных режимов малорасходных турбин. Транспортное дело России. 2015. № 6. С. 272-275.
13. Симашов Р.Р., Чехранов С.В. Определение газодинамических характеристик сопловых аппаратов с сверхзвуковыми осесимметричными соплами при моделировании переменных режимов малорасходных турбин. Морские интеллектуальные технологии. 2016. № 3(33) Т.1. С. 173-180.
14. Чехранов С.В. Экспериментальные исследования двухступенчатых малорасходных турбин с частичным облопачиванием рабочего колеса. Вестник ТОГУ. 2013. №3(30). С. 73 – 80.

#### References

1. Zhukovskij G.V., Marchenko Ju.A., Teren'tev I.K. Teplovye raschety parovyh i gazovyh turbin s pomoshh'ju JeVM. L.: Mashinostroenie, 1983. 255 s.
2. Lapshin K.L. Optimizacija protochnyh chastej mnogostupenchatyh turbin. SPb.: Izd-vo S.-Peterburgskogo universiteta, 1992. 196 s.
3. Zaslavskij S.A., Liberman M.A., Simkin M.A., Sirotkin Ja.A. Odnomernyj proverochnyj raschet malorazmernih dozvukovyh osevyh gazovyh turbin na JeVM Jenergomashinostroenie. 1978. №7. S. 13-15.
4. Lapshin K.L., Riss V. K raschetu osevyh teplovyh turbin na peremennyh rezhimah. Teplojenergetika. 1992. №5. S. 64-66.
5. Ovsjannikov B.V., Uvarov S.E., Hudenko B.G. Osobennosti rascheta kpd aktivnoj parcial'noj gazovoj turbiny pri izmenenii protivodavlenij v shirokom diapazone. Izv. vuz. Aviacionnaja tehnika. 1990. №1. S. 66-70.
6. Samojlovich G.S., Trojanovskij B.M. Peremennye i perehodnye rezhimy v parovyh turbinah. M.: Jenergoizdat, 1982. 496 s.
7. Sirotkin Ja.A. Poverochnyj raschet mnogostupenchatyh parovyh turbin. Teplojenergetika. 1982. №12. S. 21-24.
8. Sirotkin Ja.A. Odnomernyj proverochnyj aerodinamicheskiy raschet ohlazhdaemyh gazovyh turbin. Izvestija AN SSSR. Jenergetika i transport. 1980. №1. S.137-148.
9. Subbotovich V.P. Ob optimizacii grupy turbinnih stupenej i reshenii prjamoj zadachi rascheta techenija po srednemu diametru po edinoj vychislitel'noj sheme. Jenergeticheskoe mashinostroenie. 1990. №49. S. 28-31.
10. Topunov A.M. Teorija sudovyh turbin. L.: Sudostroenie, 1985. 472 s.
11. Morozova N.T. Simashov R.R. Matematicheskaja model' malorashodnoj turbiny na osnove prjamoj zadachi turbinnoj stupeni. Vestnik TOGU. 2015. №1(36). S. 133 – 140.
12. Simashov R.R., Chehranov S.V. Raschetnaja ocenka koeficientov rashoda pri modelirovanii peremennyh rezhimov malorashodnyh turbin. Transportnoe delo Rossii. 2015. № 6. S. 272-275.
13. Simashov R.R., Chehranov S.V. Opredelenie gazodinamicheskikh harakteristik soplovyh apparatov s sverzvukovymi osesimmetrichnymi soplami pri modelirovanii peremennyh rezhimov malorashodnyh turbin. Morskie intellektual'nye tehnologii. 2016. № 3(33) Т.1. S. 173-180.
14. Chehranov S.V. Jeksperimental'nye issledovanija dvuhstupenchatyh malorashodnyh turbin s chastichnym oblopachivaniem rabocheho kola. Vestnik TOGU. 2013. №3(30). S. 73 – 80.

УДК 621.43.013 – 629.3

## НОВЫЕ СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЧИСТКИ ТОПЛИВ И МАСЕЛ СУДОВЫМИ ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ АППАРАТАМИ СО СЛОЖНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКОЙ

**Геннадий Петрович Кича**

доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой Судовых двигателей внутреннего сгорания  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: (423) 251-52-26; e-mail: kicha@msun.ru

**Андрей Вениаминович Надежкин**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Судовых двигателей внутреннего сгорания  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: (423) 251-52-26; e-mail: nadezkin@msun.ru

**Людмила Анатольевна Семенюк**

старший преподаватель  
кафедры Судовых двигателей внутреннего сгорания  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: (423) 251-52-26; e-mail: semenuk@msun.ru

### Аннотация

Цель исследований состоит в представлении общей стохастической модели и её разветвлений с рассмотрением функционирования разных типов центробежных аппаратов для идентификации фракционных коэффициентов и полноты отфуговывания нерастворимых примесей при очистке топлив и масел от загрязнений. Случайные воздействия на дисперсионную систему при центрифугировании являются дельта-коррелированной функцией времени, поэтому процесс выделения дисперсной фазы принят марковским и для объединения детерминированного и стохастического влияния на дисперсную фазу при её осаждении в центробежном поле использовано уравнение Колмогорова – Фоккера – Планка. Реализация его при сложной гидродинамике потоков в центрифугах, циклонах и сепараторах позволяет отказаться от проведения модельных экспериментов для уточнения отдельных показателей этих агрегатов и с высокой точностью прогнозировать фракционную и общую эффективность судовых топливо- и маслоочистителей. Новый результат в теории центрифугирования достигнут учётом действующих на осаждаемые продукты внешних сил, специфики дисперсионных систем, локальности и поля скоростей потоков в очистителях, исследованием перемещения ансамбля частиц в возмущённом потоке с флуктуациями, вызываемыми пристенными эффектами, стеснённой движением, формой и концентрацией компонентов дисперсной фазы, турбулентными пульсациями.

**Ключевые слова:** стохастическая модель центрифугирования, марковские процессы, разделение гетерогенных систем, гидродинамика центробежных аппаратов, эффективность топливо- и маслоочистителей, эффективность циклонов и сепараторов

## NEW STOCHASTIC MODELS FOR CLEANING FUELS AND OILS BY MARINE CENTRIFUGAL APPARATUS WITH A COMPLEX HYDRODYNAMIC SITUATION

**Gennady P. Kicha**

Professor, Dr. Sci. Tech.  
director of the department of Marine internal combustion engines  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: (423) 251-52-26; e-mail: kicha@msun.ru

**Andrei V. Nadezkin**

Professor, Dr. Sci. Tech.  
Professor of the department of Marine internal combustion engines  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: (423) 251-52-26; e-mail: nadezkin@msun.ru

**Liudmila A. Semeniuk**

senior lecturer  
of the department of Marine internal combustion engines  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: (423) 251-52-26; e-mail: semenuk@msun.ru



### Abstract

The aim of the research is to present a general stochastic model and its branches with consideration of the functioning of different types of centrifugal apparatus for identifying fractional coefficients and completeness of cleaning the insoluble impurities during treatment of oils from contaminants. Accidental effects on the dispersion system during centrifugation are a delta-correlated function of time, so the process of separating the dispersed phase is accepted as Markov process and the Fokker – Plank – Kolmogorov equation is used to combine the determinated and stochastic action on the dispersed phase upon its precipitation in a centrifugal field. Its implementation in the complex hydrodynamics of flows in centrifuges, cyclones and separators allows us to abandon the performance of model experiments to specify the individual indices of these aggregates and to predict the fractional and overall efficiency of marine fuel and oil purifiers with high accuracy. The new result in the theory of centrifugation is achieved by taking into account the external forces acting on precipitating products, the specific features of the dispersion systems, the locality and the velocity field of the streams in the cleaners, the study of the ensemble of particles in the disturbed flow with fluctuations caused by wall effects, constrained motion, the shape and concentration of the components of the dispersed phase, turbulent pulsations.

**Keywords:** *stochastic model of centrifugation, Markov processes, separation of heterogeneous systems, hydrodynamics of centrifugal apparatuses, efficiency of fuel and oil cleaners, efficiency of cyclones and separators*

### Введение

В Морском государственном университете им. адмирала Г. И. Невельского проведен обширный цикл комплексных теоретических и экспериментальных исследований фильтрации и центрифугирования при очистке технических сред, используемых в судовых дизелях. Изучение закономерностей разделения сложных дисперсионных систем, каковыми являются применяемые в ДВС моторного масла и топлива с продуктами их старения и внешнего загрязнения, велось в широком диапазоне физико-механических свойств разделяемых фаз, дисперсности загрязнителя и конструктивно-эксплуатационных факторов очистителей.

Обилие конструктивных решений фильтров и центрифуг создаёт трудности в разработке математической модели для описания гидродинамических процессов разделения в этих аппаратах. Существующие теории разделения в большой мере базируются на эмпирическом подходе: фракционная эффективность очистителя задается по результатам эксперимента с нахождением связи её с одним-двумя легко определяемыми параметрами процесса. Ряд расчетных зависимостей включает коэффициенты, получение которых при гидродинамическом или масштабном моделировании невозможно без экспериментов на реальных установках. Эмпирический подход не позволяет прогнозировать с достаточной для практических целей точностью задерживающую способность очистителя в широком диапазоне его эксплуатационных режимов. Разработанные на подобной базе зависимости нельзя использовать для оценки эффективности новых научно-технических решений при создании оригинальных и перспективных очистительных аппаратов.

Большинство современных теоретических моделей не учитывают взаимодействия частиц дисперсной фазы в процессах фильтрации и центрифугирования. При разделение многофазных систем возможны коагуляция первичных частиц и разрушение, диспергирование состоящих из них агрегатов, что в значительной мере случайно и обусловлено диспергирующе-стабилизирующими

свойствами дисперсионной среды и гидродинамическими воздействиями на твердую фазу.

Разработаны и испытаны на практике принципиально новые стохастические модели разделения сложных гетерогенных систем, и дано их математическое описание с привлечением представлений и аппарата случайных марковских процессов при рассмотрении стесненного движения совокупности реальных частиц. Процесс фильтрации описан в работе [1,2]. В статье рассматривается универсальная модель очистки топлив и масел в центробежном поле, созданная на базе стохастического подхода. Особенностью метода является использование дифференциального уравнения движения частицы в радиальном направлении в поле действия центробежных сил инерции, сил Кориолиса. Уравнение, описывающее детерминированное воздействие на дисперсную фазу, дополняется членом, учитывающим стохастичность процесса. Случайная составляющая скорости может быть вызвана турбулентными пульсациями, стесненностью движения дисперсной фазы, приводящими к флуктуации скорости её осаждения. Стохастичность обусловлена также объединением частиц при столкновениях и разрушением вторичных образований их вследствие действия гидродинамических факторов.

Рассматриваемый подход к идентификации очистки предпочтителен [3, 4], поскольку довольно полно отражает сущность процессов, происходящих в центрифугах и сепараторах. Обобщение стохастических воздействий на центрифугирование с учётом гидродинамических особенностей движения потоков разделяемых сред в центробежном поле позволяет расчетным путем без модельных экспериментов определять все показатели разделения, прогнозировать общую и фракционную эффективность топливо- и маслоочистителей ДВС.

### 1. Общая стохастическая модель процесса разделения

Рассмотрим основы предложенного подхода и пути его реализации посредством составления кинетических уравнений квазистационарного движения частиц в центробежном поле [2,4]

$$\frac{dx_i}{d\tau} = F_i(x_1, x_2, \dots, x_n, \tau) + \xi_i(x_1, x_2, \dots, x_n, \tau), \quad (1)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n),$$

где  $F_i$  и  $\xi_i$  – соответственно совокупность детерминированных и случайных воздействий на дисперсионную систему, определяющих протекание разделительного процесса через обобщенные координаты и скорости  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Для упрощения анализа можно принять, что случайное воздействие  $\xi_i$  является дельта-коррелированной функцией времени  $\tau$  с нулевым средним значением и интенсивностью  $b_0$ . Эта предпосылка правдоподобна и подтверждена опытом центрифугирования [3, 4] и других сходных разделительных процессов [2, 3].

Если допустить  $\xi_i(x_1, x_2, \dots, x_n, \tau) = 0$  и  $\xi_i(x_1, x_2, \dots, x_n, \tau)$

$$\xi_i(x_1, x_2, \dots, x_n, \tau + t) = b_{ij}(x_1, x_2, \dots, x_n, \tau) \delta(t),$$

то процесс, описываемый уравнением (1), будет марковским и может быть охарактеризован многомерной плотностью вероятности  $W = W(x_1, x_2, \dots, x_n, \tau)$  и интерпретирован блужданием изображаемой точки (частицы) в многомерном фазовом пространстве [4]. По физическому смыслу  $W dx_1 dx_2 \dots dx_n$  определяет количество частиц, находящихся в момент  $\tau$  в элементарном объеме фазового пространства с указанными координатами и скоростями  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Именно в значении относительной концентрации частиц заданного размера истолковано и будет в дальнейшем применено понятие вероятности.

Для случайного марковского процесса стохастическому кинетическому уравнению (1) соответствует уравнение Колмогорова – Фоккера – Планка [2–5]

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = - \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} A_i(W) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (B_{ij}W), \quad (2)$$

коэффициенты которого  $A_i$  и  $B_{ij}$  находятся из выражения (1) по правилу [2, 4]:

$$A_i = F_i(x_1, x_2, \dots, x_n, \tau);$$

$$B_{ij} = b_{ij}(x_1, x_2, \dots, x_n, \tau).$$

Задачи центрифугирования таковы, что по уравнению (2) необходимо установить вероятность достижения рассматриваемой частицей определенных границ или уноса ее из конкретной области фазового пространства.

Уравнение (2) может быть решено при соответствии предлагаемых начальных и граничных условий конструктивным и технологическим особенностям подачи в центробежное поле

загрязненного нефтепродукта.

Если в исходный момент центрифугирования частицы равномерно распределены в объеме фазового пространства, то в силу нормированности плотности вероятности начальное условие запишется в виде

$$W_0 = \frac{1}{\int dx_1 dx_2 \dots dx_n}. \quad (3)$$

Большинство конструкций очистителей удовлетворяет граничному условию [4]

$$G_i(W) = A_i W|_s + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \frac{\partial}{\partial x_j} B_{ij} W|_s = K_i W|_s, \quad (4)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n),$$

выражающему пропорциональность потока частиц  $G_i(W)$  в направлении орта соответствующей фазовой координаты через граничную поверхность  $s$  фазового пространства концентрации  $W_s$  у этой поверхности.

Коэффициенты  $K_i = K_i(x_1, x_2, \dots, x_n, \tau)$  характеризуют скорость уноса частиц из фазового пространства.

Если  $G_i(W) = 0$ , частицы полностью отражаются от граничной поверхности  $s$ ; если  $K_i = \infty$ , происходит полное поглощение частиц поверхностью (отложение на ней) или беспрепятственный унос их из фазового пространства через указанную поверхность. В этом случае  $W_s = 0$ .

## 2. Процессы очистки топлив и масел центрифугированием и сепарированием

В настоящее время наблюдается некоторое отставание теории расчета от практики применения центробежных очистителей (ЦО). Для создания принципиально новых направлений в инженерном оформлении систем очистки топлива и масла в ДВС необходима разработка теоретических основ расчета и конструирования высокоэффективных центрифуг, сепараторов и гидроциклонов. Значительная интенсификация процессов центрифугирования горюче-смазочных материалов (ГСМ) возможна на базе их стохастического моделирования. Предложенная теория позволяет не только оценить и повысить эффективность очистки, но и создает предпосылки для оптимизации конструкции по энергозатратам и материалоемкости, сокращения потерь сепарируемой жидкости, расхода ее на гидропривод, увеличения пропускной способности очистителей.

Рассмотрим процесс центрифугирования в ЦО со сложной гидродинамической обстановкой. Центрифуги с комбинированным радиально-осевым сливом (Рис. 1) нашли широкое применение в ДВС на судах [4].

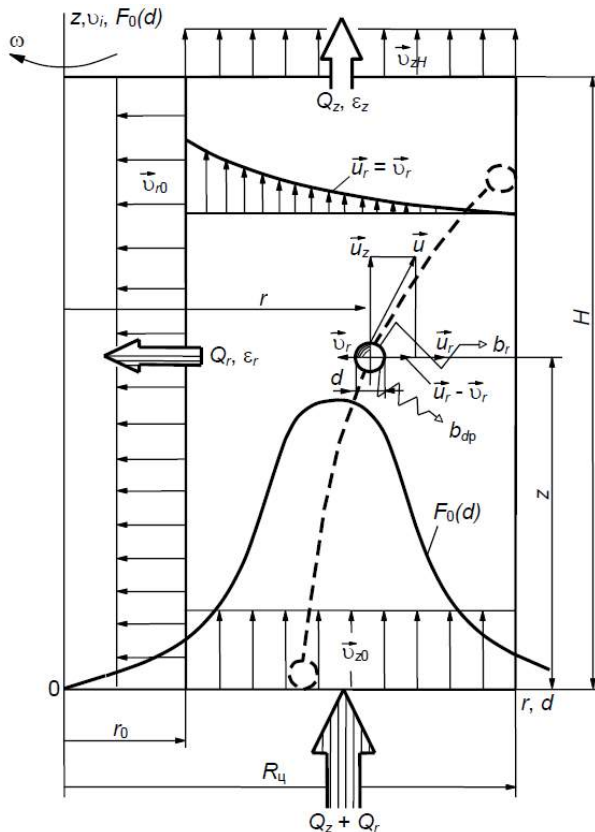


Рис. 1. Расчётная схема центрифуги с комбинированным сливом

Особенностью конструкции является наличие напорного осевого потока  $Q_z$  и безнапорного радиального слива  $Q_r$ . Первый, как правило, представляет собой фугат, поступающий потребителю, второй – поток, идущий на гидрореактивный привод ротора очистителя. Возможны и другие схемы реализации  $Q_z$  и  $Q_r$  в смазочных и топливных системах ДВС.

Вследствие путевого радиального отбора жидкости  $Q_r$  по высоте центрифуги выражение для осевой и радиальной скорости потоков внутри ротора имеет вид [4]:

$$v_z = \frac{Q_z + Q_r(1 - z/H)}{\pi(R^2 - r_0^2)}; v_r = \frac{Q_r(r - R^2/r)}{2\pi H(R^2 - r_0^2)}$$

Если пренебречь изменением осевой скорости потока по высоте ротора и принять ее равной  $v_z = \frac{2Q_z + Q_r}{2\pi(R^2 - r_0^2)}$ , то уравнение (1) идентифицируется следующим образом:

$$\frac{dr}{d\tau} = -\frac{d^2(\rho_d - \rho)\omega^2 r}{18\mu} - \frac{Q_r(r - R^2/r)}{2\pi H(R^2 - r_0^2)} + \frac{1}{3\pi\mu d}\xi(\tau), \quad (5)$$

где  $d$  – стоксовый диаметр частиц,  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости;  $\rho_d$  и  $\rho$  – плотность частиц и дисперсионной среды;  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора;  $\xi$  – функция случайного воздействия.

Для рассматриваемой конструкции очистителя в соответствии с выражением (2)  $W(r, \tau)dr$  характеризует относительное число частиц диаметра  $d$ , находящихся в сечении аппарата  $r$  в момент  $\tau$ , и может быть определена решением дифференциального уравнения

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = -\frac{\partial}{\partial r} \left[ \left( \alpha - \frac{\gamma}{r} \right) W \right] + \frac{b_r}{2} \frac{\partial^2 W}{\partial r^2}. \quad (6)$$

с соответствующими выражению (5) коэффициентами

$$b_r = \frac{b_0}{9\pi^2\mu^2 d^2}; \quad \alpha = \alpha_d + \alpha_r = \frac{d^2(\rho_d - \rho)\omega^2}{18\mu} + \frac{Q_r}{2\pi H(R^2 - r_0^2)}; \quad \gamma = \frac{Q_r R^2}{2\pi H(R^2 - r_0^2)}$$

Граничные условия, указывающие на отсутствие перемещения частиц вдоль радиуса при достижении ими стенки аппарата ( $r = R$ ), а также зоны противотока ( $r = r_0$ ) и определяющие унос частиц соответственно из центрифугируемой жидкости и с радиальным сливом, могут быть записаны в виде

$$W(r_0, \tau) = W(R, \tau) = 0.$$

За начальное при  $\tau = 0$  принимали условие

$$W(r, 0) = W_0(r) = \frac{2r}{R^2 - r_0^2}$$

характеризующее равномерное распределение частиц одного диаметра по площади поперечного сечения ротора.

После введения безразмерных переменных  $\bar{\tau} = \frac{b_r \tau}{2(R - r_0)^2}$ ,  $\bar{r} = \frac{r - r_0}{R - r_0}$  дифференциальное уравнение (6), граничные и начальные условия имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial \bar{\tau}} &= -\frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left( \alpha(\bar{r})W \right) + \frac{\partial^2 W}{\partial \bar{r}^2}; \\ W|_{\bar{r}=0} &= W|_{\bar{r}=1} = 0; \\ W|_{\bar{\tau}=0} &= \frac{2[(R - r_0)\bar{r} + r_0]}{R + r_0}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Здесь

$$\alpha(\bar{r}) = \frac{2(R - r_0)}{b_r} \left\{ \alpha[(R - r_0)\bar{r} + r_0] - \frac{\gamma}{(R - r_0)\bar{r} + r_0} \right\}.$$

Решение системы (7) искали по методу Фаэдо – Галёркина [5]

$$W_n = \sum_{k=1}^n C_k(\bar{\tau}) \psi_k(\bar{r}), \quad (8)$$

где  $\psi_k(\bar{r})$  – ортонормированные собственные функции задачи;

$$\psi'' = \lambda \psi; \quad \psi|_{\bar{r}=0} = \psi|_{\bar{r}=1} = 0. \quad (9)$$

Коэффициенты  $C_k(\bar{\tau})$  определялись из соотношения

$$\int_0^1 \left[ \frac{\partial W_n}{\partial \bar{\tau}} - \frac{\partial^2 W_n}{\partial \bar{r}^2} + \frac{\partial}{\partial \bar{r}} (\alpha(\bar{r})W_n) \right] \psi_k(\bar{r}) d\bar{r} = 0, \quad (10)$$

$$(k = 1, 2, \dots, n).$$

Решение задачи (9) представлено в виде [6]

$$\psi_k(\bar{r}) = \sqrt{2} \sin k\pi\bar{r}, \lambda_k = -(k\pi)^2$$

Подставляя найденные  $\psi_k(\bar{r})$  в уравнения (8) и (9), получили систему линейных обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами, которую использовали для определения  $C_k(\bar{\tau})$

$$\begin{aligned} \frac{dC_k}{d\bar{\tau}} &= -(k\pi)^2 C_k - \sum_{i=1}^n C_i \int_0^1 a(\bar{r}) \psi_i(\bar{r}) \psi_k(\bar{r}) d\bar{r}; \\ C_k(0) &= C_{0k} = \int_0^1 \frac{2}{R^2 - r_0^2} [\bar{r}(R - r_0) + r_0] \psi_k(\bar{r}) d\bar{r} = \\ &= \frac{2\sqrt{2}}{(R^2 - r_0^2)k\pi} [R(-1)^{k+1} + r_0], \quad (11) \\ &\quad (k = 1, 2, \dots, n). \end{aligned}$$

Интегрируя выражение  $I_{ik} = -2 \int_0^1 a(\bar{r}) \sin k\pi\bar{r} \cdot \sin i\pi\bar{r} d\bar{r}$ , входящее в выражение (11), по частям, получили

$$\begin{aligned} I_{ik} &= 2k\pi \int_0^1 a(\bar{r}) \sin i\pi\bar{r} \cos k\pi\bar{r} d\bar{r} = \\ &= k\pi \int_0^1 a(\bar{r}) [\sin(i+k)\pi\bar{r} + \sin(i-k)\pi\bar{r}] d\bar{r}. \end{aligned}$$

Для вычисления  $I_{ik}$  применили одну из квадратурных формул [7]

Задача (11) в матричной форме записана в виде

$$\frac{d\vec{C}}{d\bar{\tau}} = A_n \vec{C}; \vec{C}(0) = \vec{C}_0$$

где  $\vec{C} = (C_1(\bar{\tau}); C_2(\bar{\tau}), \dots; C_n(\bar{\tau}))$ ;  $\vec{C}_0 = (C_{01}, C_{02}, \dots, C_{0n})$ ;

$$A_n = \{a_{ij}\}_{i,j=1}^n; a_{ij} = -(i\pi)^2 + I_{ij}; a_{ij} = I_{ij}.$$

Окончательно приближенное решение задачи (7) приняло вид

$$W_n^{(l)} = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{k=0}^l A_n^k \vec{C}_0 \frac{\bar{\tau}^k}{K!} \right)_i \sqrt{2} \sin i\pi\bar{\tau}. \quad (12)$$

Относительная концентрация частиц диаметра  $d$  в поперечном сечении ротора центрифуги в момент  $\tau$  составила

$$C_d(\tau) = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{k=0}^l A_n^k \vec{C}_0 \frac{\bar{\tau}^k}{K!} \right)_i \frac{\sqrt{2}}{i\pi} [(-1)^{i+1} + 1]. \quad (13)$$

По физическому смыслу  $C_d(\bar{\tau})$  эквивалентно коэффициенту пропуски  $\bar{\epsilon}_{dz}$  в направлении оси  $z$ , т.е. характеризует относительное количество частиц, уходящих с потоком  $Q_z$ . Доля их, уносимая потоком  $Q_r$  находится, согласно уравнениям (4) и (7), как поток вероятности через внутреннюю обечайку ротора

$$\bar{\epsilon}_{dr} = \int_0^{\bar{\tau}} \left( -a(\bar{r})W + \frac{\partial W}{\partial \bar{r}} \right) \Big|_{\bar{r}=0} d\bar{\tau}. \quad (14)$$

Аналогично рассчитывали поток частиц через наружную обечайку ротора, определяющий полный фракционный коэффициент отсева центрифуги,

$$\varphi_d = \int_0^{\bar{\tau}} \left( -a(\bar{r})W + \frac{\partial W}{\partial \bar{r}} \right) \Big|_{\bar{r}=1} d\bar{\tau}. \quad (15)$$

Переход к локальным фракционным задерживающим характеристикам центрифуги можно осуществить через безразмерные потоки очищаемости жидкости  $\bar{Q}_z$  и  $\bar{Q}_r$ :

$$\varphi_{dz} = 1 - \frac{\bar{\epsilon}_{dz}}{\bar{Q}_z} = 1 - \frac{Q_z + Q_r}{Q_z} \bar{\epsilon}_{dz}; \quad (16)$$

$$\varphi_{dr} = 1 - \frac{\bar{\epsilon}_{dr}}{\bar{Q}_r} = 1 - \frac{Q_z + Q_r}{Q_r} \bar{\epsilon}_{dr}. \quad (17)$$

Здесь  $\varphi_{dz}$  и  $\varphi_{dr}$  – фракционные коэффициенты отсева для потоков  $Q_z$  и  $Q_r$  отображающие качество очистки жидкости в напорном и свободном сливах.

Полный и локальные коэффициенты отсева связаны посредством относительных показателей эффективности очистки  $\varphi_{dz}$  и  $\varphi_{dr}$

$$\varphi_d = \bar{\varphi}_{dz} + \bar{\varphi}_{dr} = \bar{Q}_z \varphi_{dz} + \bar{Q}_r \varphi_{dr}. \quad (18)$$

Если состав загрязнений на входе в ЦО задан дифференциальной функцией распределения  $F_0(d)$ , то коэффициент полноты отсева можно получить интегрированием выражения

$$\varphi = \int_0^{d_{\max}} \varphi_d F_0(d) dd. \quad (19)$$

Коэффициент интенсивности случайных воздействий  $b_0$  является квазидиффузионным параметром и отвечает за подвижность частиц в роторе центрифуги. Степень подвижности частиц в различных аппаратах неодинакова и зависит от конструктивных особенностей очистителя, его расходной характеристики и общей концентрации твердой фазы в суспензии  $c_0$  на входе в очиститель, которая выражена в % масс. Стохастичность процесса центрифугирования предлагается учитывать по выражению<sup>1</sup>, найденному методом множественной корреляции,

$$b_0 = 6,5 \cdot 10^{-16} \left( \frac{r_0}{H} \right)^{0,52} \left( \frac{R}{H} \right)^{0,65} \left( \frac{Q_z}{Q_z + Q_r} \right)^{0,84} c_0^{0,37}. \quad (20)$$

Анализ уравнения (20) показывает рациональность конструкций с радиально-осевым сливом для управления фракционной задерживающей характеристикой очистителя. Увеличение радиального слива  $Q_r$  способствует уменьшению подвижности и флуктуации скорости частиц в радиальном направлении, что выгодно для полнопоточных центрифуг, когда необходимо

понизить полноту отсева ГСМ от общих загрязнений при полном удалении опасных частиц механических примесей. Продолжительность работы ЦО между чистками ротора в таком случае повышается.

Возможности разработанной модели (7) проверены на очистителе МЦН-5П(КС) с комбинированным сливом. Экспериментальные данные аппроксимированы экспоненциальной зависимостью. Из графических зависимостей (Рис. 2,а)<sup>2</sup> видно, что фракционные коэффициенты пропускания  $\bar{\varepsilon}_{dz}$  и  $\bar{\varepsilon}_{dr}$  для мелких частиц и коэффициенты отсева  $\bar{\varphi}_{dz}$ ,  $\bar{\varphi}_{dr}$  для  $d \geq 30$  мкм определяются в основном соотношением потоков  $Q_r$  и  $Q_z$ .

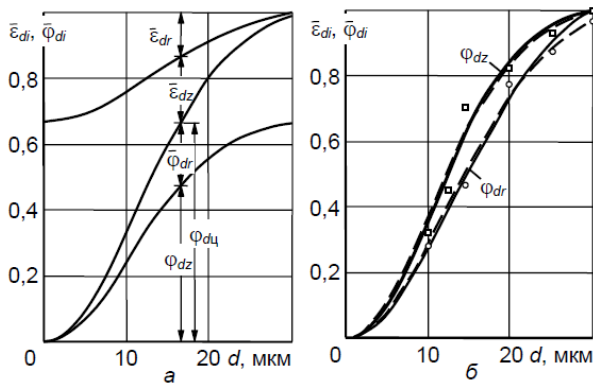


Рис. 2. Общая (а) и локальная(б) фракционная эффективность центрифуги с комбинированным сливом:  $Q_z=0,67 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $Q_r=0,33 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $V_p=1560 \text{ см}^3$ ;  $\omega=760 \text{ рад/с}$ ;  $H=152 \text{ мм}$ ;  $r_0=18 \text{ мм}$ ;  $R=60 \text{ мм}$ ;  $b_0=2,5 \cdot 10^{-13} \text{ Дж/(кг}\cdot\text{с)}$ ;  $\mu=0,03 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;  $\rho_d=2500 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho=870 \text{ кг/м}^3$ ; --- расчётные данные; - - - экспериментальные результаты

Адекватность расчетной модели (7) и соответствие ее экспериментальным данным проверены по локальным фракционным коэффициентам отсева (Рис. 2,б). Сходимость результатов расчета и эксперимента высока. Теоретические зависимости полностью располагаются в доверительных границах экспериментальных значений  $\varphi_{dz}$  и  $\varphi_{dr}$ . Коэффициенты отсева, полученные в опытах, отличались от расчетных максимально на 12 %. Среднее квадратичное отклонение экспериментальных точек от теоретической и аппроксимирующей кривых примерно одинаковое и составляет от 5 до 7 %.

Для тех же условий центрифугированная выполнено решение при разном времени  $\bar{\tau} = \alpha t$  пребывания частиц в центробежном поле. Расчетом и экспериментально определено влияние на  $\varphi_a$  не только  $\bar{\tau}$ , но и безразмерного параметра  $\bar{h} = (R - r_0) \cdot \sqrt{\alpha/b_r}$  (Рис. 3), взвешивающего отношение детерминированного воздействия на дисперсную фазу к стохастическому.

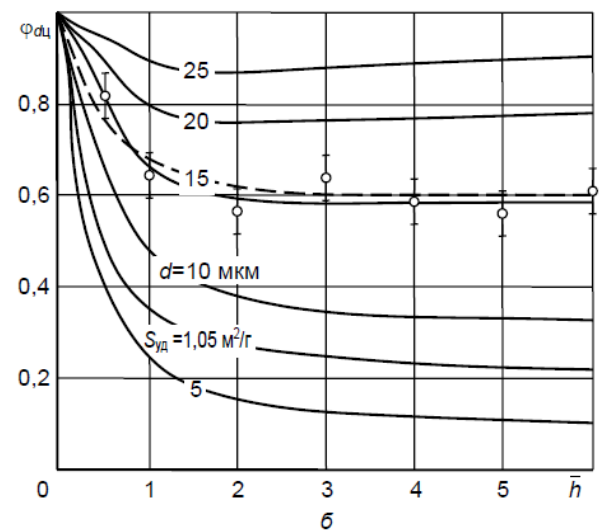
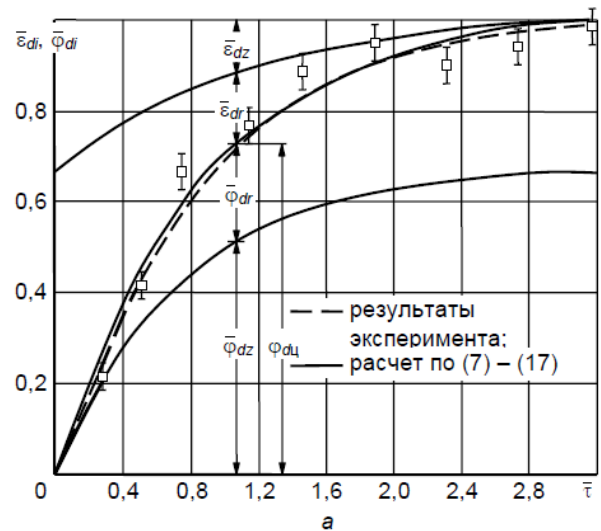


Рис. 3. Влияние безразмерных параметров  $\bar{\tau}$  (а) и  $\bar{h}$  (б) на унос и отфуговывание дисперсной фазы при очистке моторного масла

Сходимость данных расчета и эксперимента для функций  $\varphi_a(\bar{h})$  и  $\varphi_a(\bar{\tau})$  хорошая. Сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей по критерию Вилькоксона показывает, что они принадлежат к одной генеральной совокупности. Теоретические зависимости почти полностью располагаются в поле рассеяния экспериментальных данных, полученных с доверительной вероятностью 95 % по результатам трех параллельных проб.

При понижении  $\bar{h}$  вследствие роста интенсивности случайных воздействий на дисперсную фазу эффективность отсева частиц увеличивается.

При  $\bar{h} > 8$  стохастичностью процесса для частиц  $d > 10$  мкм можно пренебречь. У большинства конструкций ЦО при очистке ГСМ от крупнодисперсных загрязнителей  $\bar{h}$  находится в диапазоне 2 – 25.

Для некоторых дисперсионных систем при разделении их в центрифуге с цилиндрическим ротором радиальные составляющие силы инерции и силы Кориолиса имеют один и тот же порядок, и

пренебречь одной из них, что сделано во многих работах, недопустимо.

В зависимости для  $b_0$  концентрация  $c_0$  задана в процентах.

На графике (Рис. 2, а) фракционные характеристики уноса и отсева для удобства суммирования показателей центрифугирования смещены.

Достаточно высокую точность расчета можно получить, если одну из составляющих  $\alpha$  в формуле (6) выразить с учетом сил Кориолиса [4]

$$\alpha_d = \frac{(1+\varepsilon^2)\omega}{\varepsilon} \left[ \sqrt{1 + \frac{(\rho_d - \rho)\varepsilon^2}{\rho_d(1+\varepsilon^2)^2}} - 1 \right],$$

где  $\varepsilon = \frac{\omega \rho_d d^2}{9\mu}$  – представляет отношение силы Кориолиса к силе вязкостного трения.

Для конструкций центрифуг без радиального слива ( $Q_r = 0$ ) стохастическое уравнение процесса центрифугированная упрощается. Решение его приведено в работе [4].

Совершенствование расчета эффективности центрифугирования возможно путем уточнения радиальной скорости частиц при детерминированном описании процесса с учетом коэффициента их формы  $\psi_d$ <sup>1</sup>. В этом случае  $\alpha_d = \frac{(\rho_d - \rho)d^2\omega^2}{K_{\psi}\mu}$  и  $\varepsilon = \frac{2\omega\rho_d d^2}{K_{\psi}\mu}$  коэффициент  $K_{\psi}$  для ламинарного и переходного режимов обтекания частиц ( $Re_d < 10$ ) находится по формуле  $K_{\psi} = \frac{49,2}{2,73 + \ln \psi_d}$  [4]. Если при моделировании используется не эквивалентный, а стоксовый диаметр, определяемый, например, лабораторным центрифугированием, то  $K_{\psi}$  принимается равным 18.

Тонкослойное центрифугирование высокоэффективно. Наибольшее распространение, особенно на судах, получили сепараторы с коническими тарелками. Рассмотрим стохастическую модель такого аппарата, применив биконическую систему координат [8]. Если принять скорость движения частицы по нормали к тарелке  $u_y = \frac{d^2(\rho_d - \rho)\omega^2 x \sin \alpha \cos \alpha}{18\mu}$  и предположить, что перемещение её вдоль образующей происходит с одинаковой скоростью  $u_x = v_x = \frac{Q_c}{2\pi Z r_{cp} h}$ , определяемой пропускной способностью сепаратора  $Q_c$ , на среднем радиусе тарелок  $r_{cp}$  при межтарельчатом зазоре  $h$  и числе тарелок  $Z$ , то уравнение (2) будет иметь вид

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial(\alpha_y x W)}{\partial y} + \frac{b_y}{2} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2}, \quad (21)$$

де  $\alpha_y = \frac{\Gamma}{18\mu} \frac{d^2(\rho_d - \rho)\omega^2 \sin \alpha \cos \alpha}{v_x}$ ;  $\tau = \frac{l_{max} - x}{v_x}$ ;

$l_{max} - l_{min}$  – длина образующей тарелки;  $\alpha$  – половина угла конусности тарелки;  $x, y$  – координаты процесса.

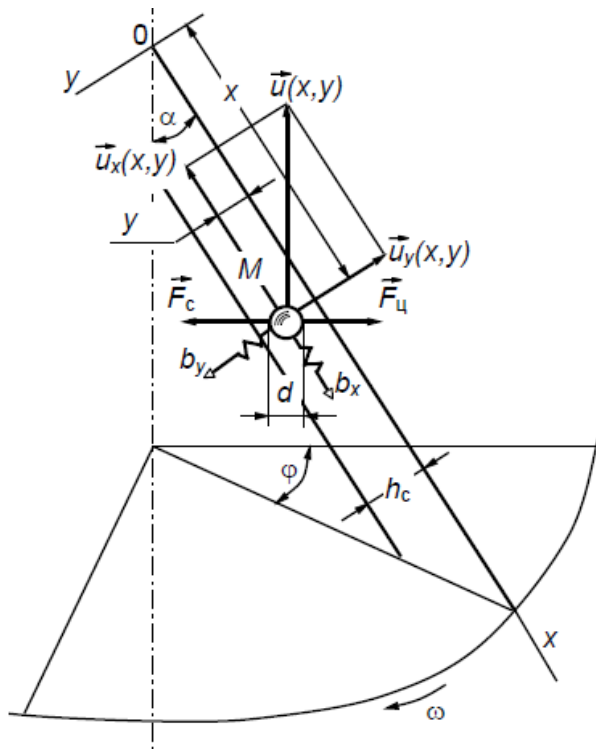


Рис. 4. Межтарельчатое пространство сепаратора в биконической системе координат

Решение (21) при начальных и граничных условиях

$$W_0(y, 0) = 1/h ; W(0, \tau) = 0 ; G_y[W(h, \tau)] = \alpha_y x W + \frac{b_y}{2} \frac{\partial W}{\partial y} = 0$$

приведено в работе [4].

Эффективность центробежного сепаратора рассчитывается через относительную концентрацию  $c_d$  частиц диаметра  $d$  на выходе из межтарельчатого зазора, т.е. в момент  $\tau_c = \frac{l_{max} - l_{min}}{v_x}$  по формуле

$$\varphi_d = 1 - c_d = 1 - \int_0^h W(y, \tau_c) dy. \quad (22)$$

Коэффициент  $\psi_d$  частиц неправильной формы находится как отношение поверхности шара, имеющего тот же объем, что и реальная частица, к ее поверхности.

### 3. Постановка и решение многомерных стохастических задач центрифугирования

Уравнение Колмогорова – Фоккера – Планка (2) предполагает представление и многомерных задач центрифугирования. Необходимость в постановке многомерных задач имеется, так как стохастичность в ЦО проявляется не только по радиусу  $r$ .

Случайные возмущения играют существенную роль в процессе очистки, действуя в направлении других координат, например  $z, d$ . Для многих случаев некорректно считать скорость процесса в направлении иных осей (кроме  $r$ ) постоянной, что даже при детерминированном подходе к решению



задачи разделения влечет за собой погрешность более 30 %.

Если в агрегате развита стохастичность, то при упрощенном подходе возможна еще большая погрешность расчета.

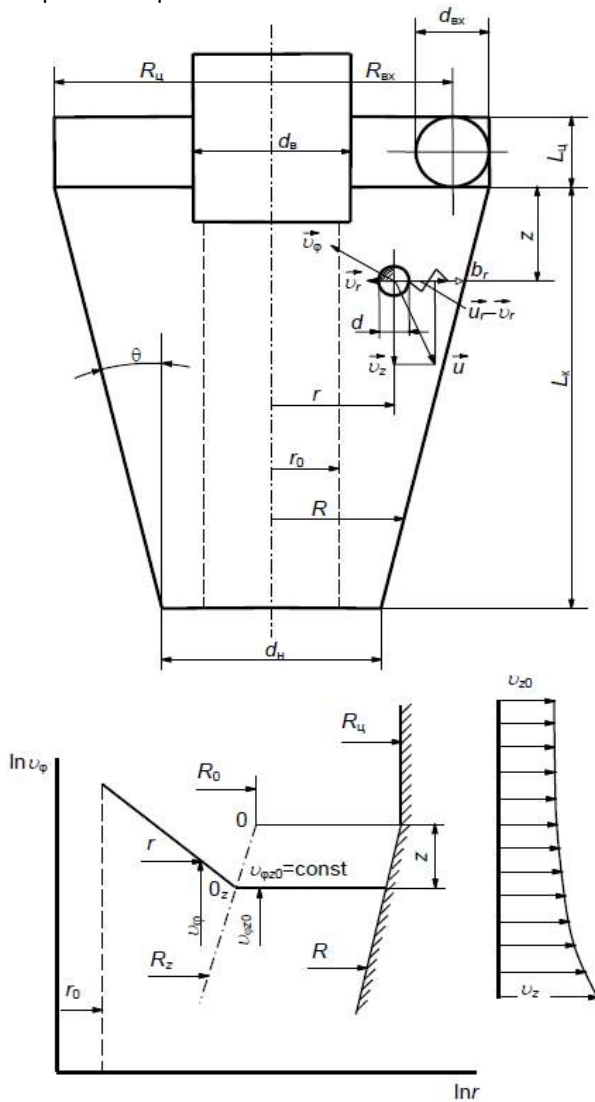


Рис. 5. Расчётная схема конического гидроциклона с обобщённым профилем тангенциальной скорости потока

Одним из аппаратов, реализующих принцип центробежного эффекта, является гидроциклон. В ряде дизелей гидроциклоны используются для полнопоточной очистки моторного масла совместно с центрифугами и фильтрами. Полагаем, что наряду с указанными комбинациями, применение гидроциклонов перспективно для очистки промывного потока в саморегенерирующихся фильтрах. Эти простые, на первый взгляд, аппараты отличаются чрезвычайно сложной гидродинамической обстановкой. Рассмотрим их в первую очередь.

Предположив обратную пропорциональность тангенциальной и радиальной скоростей жидкости радиальной координате и пренебрегая относительным движением частиц в окружном направлении и ускорением их при радиальном

перемещении [5], уравнение (2) для напорного конического гидроциклона (Рис. 1, б) запишем в виде

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = - \frac{\partial \left[ \left( \frac{\alpha_d}{r^3} - \frac{\gamma_r}{r} \right) W \right]}{\partial r} - \frac{\partial (v_z W)}{\partial z} + \frac{b_r \partial^2 W}{2 \partial r^2} + \frac{b_z \partial^2 W}{2 \partial z^2}, \quad (23)$$

$$\text{где } \bar{\alpha}_d = \frac{d^2(\rho_d - \rho) A_z^2}{18\mu}; \quad \gamma_r = A_z \left( \frac{d_{вх}^2}{8L_k R_z} - 0,014 \right);$$

$$v_z = \frac{Q_{в} + Q_{н} - 2\pi \gamma_z z}{\pi [(R_{ц} - z \operatorname{tg} \theta)^2 - r_0^2]},$$

$Q_{в}$  и  $Q_{н}$  – выход фугата и концентрата соответственно через сливное и разгрузочное отверстия.

Показатель  $A_z = R_z v_{\phi z 0}$  в этом случае является произведением двух характерных гидродинамических параметров циклонирования – радиуса  $R_z$ , начиная с которого тангенциальная скорость потока  $v_{\phi}$  постоянна, и значения этой скорости  $v_{\phi z 0}$  на участке стабилизации.

Функция  $\gamma_z$  ответственна за радиальный снос частиц. Она зависит от турбулентности потока в радиальном и окружном направлениях. Константа в выражении для  $\gamma_z$  учитывает турбулентную вязкость и вторичный унос, вызванный перемещением частиц в область входящего потока в нижней части конуса.

Значение тангенциальной скорости  $v_{\phi z 0}$  и расстояние от оси аппарата  $R_z$ , на котором имеет место соотношение  $v_{\phi z 0} = \text{const}$ , рассчитываются через коэффициент падения скорости  $\beta_0$  на входе и радиус входа  $l_0$  суспензии в аппарат:

$$v_{\phi z 0} = v_{\phi z 0} = \beta_0 v_{вх} = 2,8 \left( \frac{d_{вх}}{2R_{ц}} \right)^{0,94} \left( \frac{L_{ц}}{2R_{ц}} \right)^{-0,635} \left( \frac{R_{ц} - z \operatorname{tg} \theta}{R_{ц}} \right)^{0,85} v_{вх}, \quad (24)$$

$$R_{ц} = 2,6 \left( \frac{d_{вх}}{2R_{ц}} \right)^{0,62} (\operatorname{tg} 2\theta)^{0,23} \left( \frac{R_{ц} - z \operatorname{tg} \theta}{R_{ц}} \right)^{0,76} l_0. \quad (25)$$

где скорость потока в питающей трубке  $v_{вх}$  обусловлена суммарным расходом жидкости  $Q_{ц}$  через циклон по формуле  $v_{вх} = \frac{4Q_{ц}}{\pi d_{вх}^2}$

Зависимости (24) и (25) получены доработкой моделей, приведенных в работе [9]. Уточнение достигнуто учетом зависимостей  $v_{\phi z 0}$  и  $R_z$  от координаты  $z$ . Эпюры скоростей  $v(r, z)$  и  $v_z(r, z)$  (Рис. 5) рассчитываются через показатели  $A_z$ ,  $R_z$  и  $\gamma_z$ .

Граничные условия для гидроциклона, определяющие унос частиц через сливное  $d_{в}$  и разгрузочное  $d_{н}$  отверстия, были представлены в виде:

$$W(r, \tau) = 0 \text{ при } r = r_0 \text{ и } R = R_{ц} - z \operatorname{tg} \theta.$$

Начальное условие для аппаратов этого типа такое же, как у центрифуг.

Унос частиц с осветленным продуктом для установившегося процесса гидроциклонирования ( $\frac{\partial W}{\partial \tau} = 0$ ) определяли по формуле

$$\bar{\epsilon}_{дв} = \int_0^{L_k} \left[ - \left( \frac{\alpha_d}{r^3} - \frac{\gamma_r}{r} \right) W + \frac{b_r \partial W}{2 \partial r} \right]_{r=r_0} dz. \quad (26)$$

Со сгущенным потоком из аппарата уносится часть дисперсной фазы  $\bar{\epsilon}_{дн} = 1 - \bar{\epsilon}_{дв}$ . Унос

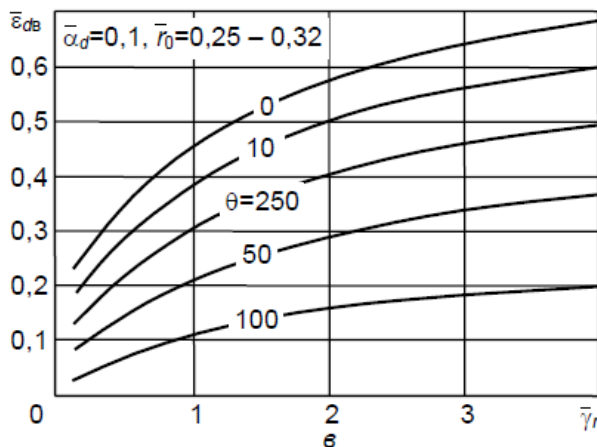
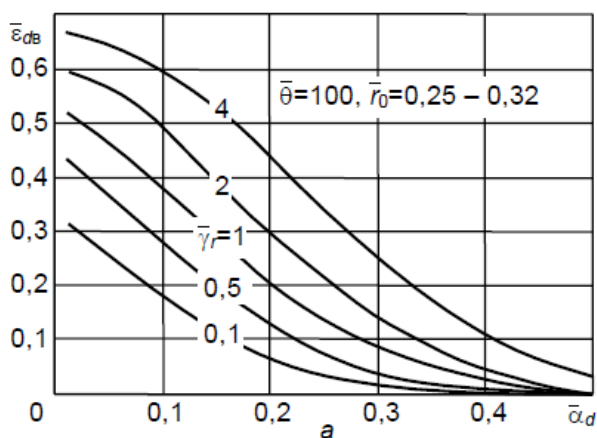
относительно потока жидкости через сливное отверстие и эффективность отсева частиц диаметром  $d$  рассчитывали по балансу  $Q_{ц}$ :

$$\varepsilon_{dB} = \frac{Q_B + Q_H}{Q_B} \varepsilon_{dB}; \varphi_{dB} = 1 - \varepsilon_{dB}$$

Реализацию уравнения (23) осуществляли при  $b_z = 0$  на ЭВМ по схеме, приведенной в работе [4]. Подвижность частиц в гидроциклоне определяли через  $b_r$  на основе уточненной зависимости для  $b_{0r}$  [5]

$$b_{0r} = 4,6 \cdot 10^{-15} \left(\frac{Q_B}{Q_H}\right)^{0,71} (\operatorname{tg} 2\theta)^{0,28} \left(\frac{c_0}{3,6}\right)^{0,72} A_{zcp}^2 \quad (27)$$

Унос нерастворимой фазы в продуктах разделения конических напорных гидроциклонов



представлен в зависимости от безразмерных параметров  $\bar{\alpha}, \bar{\gamma}, \bar{\theta}$  (Рис. 6, а, в, г), характеризующих соотношения между фактором разделения центробежного поля, интенсивностью перемешивания и радиального сноса, а также геометрическими размерами аппарата и свойствами фаз, определяющих разделяемость суспензии:

$$\bar{\alpha}_d = \frac{\pi^2 d^4 \mu (\rho_d - \rho) A_{zcp}^2}{2 R_{ц}^2 b_{0r}}; \bar{\gamma} = \frac{18 R_{ц}^2 \mu \gamma_{rcp}}{d^2 (\rho_d - \rho) A_{zcp}^2};$$

$$\bar{\theta} = \frac{18 \mu v_{zcp} R_{ц}^3 \operatorname{tg} \theta}{d^2 (\rho_d - \rho) A_{zcp}^2}; \bar{r}_0 = \frac{r_0}{R_{ц}}; b_r = \frac{b_{0r}}{9 \pi^2 \mu^2 d^2}.$$

Здесь  $v_{zcp}$  и  $A_{zcp}$  – средние значения осевой скорости и  $A_z$ .

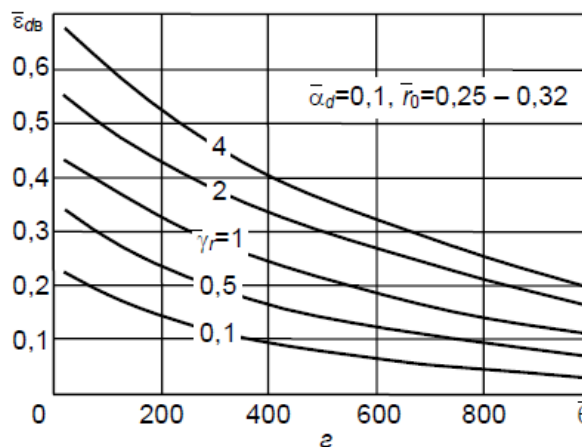
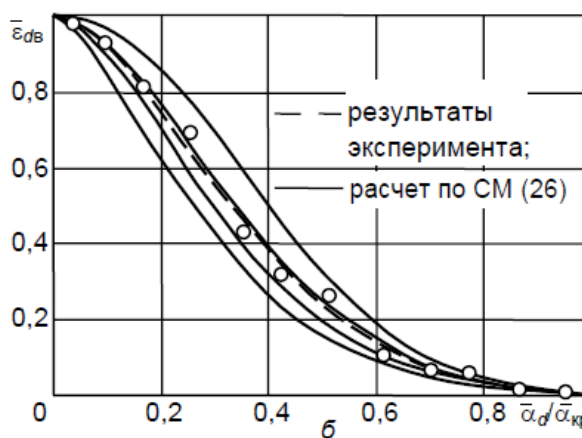


Рис. 6. Характеристика уноса дисперсной фазы с осветлённым продуктом конического гидроциклона

Зависимости, полученные на основе равенств (23) – (27), хорошо аппроксимируются экспонентами и имеют удовлетворительную сходимость с данными работы [9]. Через  $\bar{\alpha}_{кр}$ , которое определяет размеры частиц и условия осветления продукта до  $\varepsilon_{dB} < 1\%$ , представлены универсальные характеристики уноса конического гидроциклона (Рис. 6,б). Для циклонирования с параметрами  $\bar{\gamma} = 2, \bar{\theta} = 100$  и  $\bar{r}_0 = 0,3$  приведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных, показывающее

хорошую их сходимость. Среднее квадратичное отклонение составляло 6 %.

Идентифицировать задерживающую способность ЦО с большой точностью удалось за счет использования автоматизированного видеооптического комплекса с высокой разрешающей способностью. Экспериментальная установка с вмонтированной микроЭВМ позволяет определять фракционный коэффициент отсева с шагом менее 5 мкм.

Наибольшее воздействие на эффективность циклонирования оказывает параметр  $\bar{\alpha}$ , обуславливающий напряженность центробежного поля и стохастические процессы в нем. Меньше всего  $\bar{\varepsilon}_{dv}$  зависит от параметра  $\bar{\theta}$ . При  $\bar{\gamma}_r < 4$  влияние радиального сноса частиц, на  $\bar{\varepsilon}_{dv}$  стабилизируется.

Располагая семейством кривых  $\bar{\varepsilon}_{dv}(\bar{\alpha}, \bar{\gamma}_r, \bar{\theta}, \bar{r}_0)$  (Рис. 6), отражающих зависимость уноса частиц от главных факторов, которые определяют эффективность гидроциклонирования, можно достаточно точно без предварительных экспериментов рассчитать не только задерживающую способность аппарата, но и содержание фракций по дисперсному составу в осветленном и сгущенном потоках. Полученная методика позволяет строить и использовать характеристики уноса для аппаратов любой конструкции.

**4. Идентификация стохастического разделения гетерогенных систем с неустойчивой дисперсной фазой**

Дисперсионные среды, используемые в ДВС, весьма неустойчивы. В результате коагуляции и диспергирования нерастворимых продуктов загрязнения моторного масла и топлива дисперсный состав этих примесей нарушается, вследствие чего эффективность удаления их при фильтрации и центрифугировании понижается. Значительные изменения дисперсной фазы наблюдаются в самом процессе очистки в результате действия гидродинамических факторов и поверхностных сил, ослабляющих адгезию между частицами. Разрушающее напряжение в частице при центрифугировании может быть вызвано относительным движением ее в жидкости и градиентом скоростей потока. С увеличением размера флоккул связь между частицами ослабевает. Чтобы флокула разрушилась, разность динамического давления на некоторых её участках должна превышать предел прочности агрегатированной мицеллы, связанной сольватной

оболочкой. Рост угловой скорости вращения потока и пропускной способности ЦО усиливает деструкцию частиц твердой фазы загрязнений.

Частицы полидисперсной фазы загрязнений взаимодействуют друг с другом, чему способствует неодинаковая скорость их движения в центробежном поле. Крупные частицы, наталкиваясь на мелкие, вовлекают их в радиальное движение. Происходящее в результате укрупнение частиц положительно влияет на кинетику разделения.

При срабатывании стабилизирующих и моще-диспергирующих присадок возможно агрегатирование частиц дисперсной фазы. Равновесие между силами притяжения и отталкивания нарушается, и, сблизившиеся до определенного расстояния частицы флокулируют. Скорость флокуляции пропорциональна концентрации нерастворимых продуктов в центрифугируемой жидкости и активного компонента стабилизирующих присадок. Таким образом, деформация, разрушение и укрупнение частиц при осаждении в центробежном поле сказываются на кинетике разделения сложных технических суспензий.

Совершенствование идентификации разделения гетерогенных систем в центробежной поле заключается в комплексном учете детерминированного и случайного влияния на скорость движения частиц и изменение дисперсного состава механических примесей в процессе очистки.

При описании кинетики центрифугирования технических суспензий с неустойчивой дисперсной фазой принята гипотеза о его марковской природе [4]. Полученная математическая модель универсальна и пригодна для любых ЦО. Краевые задачи разделения в центробежном поле гетерогенных неустойчивых полидисперсных систем реализованы на основе уравнения (2).

Для стационарного режима центрифугирования в многомерном пространстве (Рис. 1,а) плотность вероятности  $W(r, z, d, \tau)$  находили решением уравнения

$$\frac{\partial}{\partial z}(u_z W) + \frac{\partial}{\partial r}(u_r W) + \frac{\partial}{\partial d}(u_d W) = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{b_z}{2} \frac{\partial W}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{b_r}{2} \frac{\partial W}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial d} \left( \frac{b_d}{2} \frac{\partial W}{\partial d} \right), \tag{28}$$

где  $u_z$ ,  $u_r$  и  $u_d$  – осевая, радиальная скорость движения и изменения диаметра частицы;  $b_z$ ,  $b_r$ ,  $b_d$  – интенсивность случайных воздействий по соответствующим координатам.

Для численного решения уравнения (28) через характеристику дисперсного состава загрязнителя необходимо задаться начальным условием, которое при тонко- и толстослойном центрифугировании соответственно запишется в виде

$$W = W_0 = \frac{F_0(d)}{R-r_0} = \frac{F_0(d)}{h} \text{ и } W_0 = \frac{F_0(d)r}{R^2-r_0^2}.$$

При струйном поверхностном течении жидкости в роторе ЦО предполагается сосредоточение частиц в исходном сечении подвижного слоя.

Граничные условия по  $d$  в диапазоне дисперсного состава частиц от 0 до  $d_{max}$  задаются ограничением перетекания частиц за пределы указанной зоны фазового пространства по  $d$

$$\left( u_d W - \frac{b_d}{2} \frac{\partial W}{\partial d} \right) \Big|_{d=0}^{d=d_{max}} = 0.$$

Граничные условия для других координат, например  $r$  использованы в ранее приведенных примерах и представляют собой равенство нулю потока или плотности вероятности в зависимости от того, отражает или поглощает частицы фазовая поверхность с заданными координатами.

Алгоритм численного решения задачи (28) имеет специфику, обусловленную универсальностью полученного уравнения и возможностью употребления его для частных случаев.

Учитывая, что коэффициенты уравнения могут иметь разную зависимость от  $z, r, d$ , а также то, что для определенных условий некоторые из них могут быть равными нулю, например, допустимо пренебречь случайными процессами в направлении осей  $z$  и  $d$  и принять  $b_z = b_d = 0$ . Построим

разностную схему, которая могла бы применяться независимо от соотношения коэффициентов.

Для численного решения используем метод расщепления уравнения по переменным  $r$  и  $d$  [4]:

$$\frac{(u_z W)^{k+1/2} - (u_z W)^k}{\Delta z/2} + \frac{\partial(u_r W)^k}{\partial r} + \frac{\partial(u_z W)^{k+1/2}}{\partial d} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{b_r}{2} \frac{\partial W}{\partial r} \right)^k + \frac{\partial}{\partial d} \left( \frac{b_d}{2} \frac{\partial W}{\partial d} \right)^{k+1/2} \quad (29)$$

$$\frac{(u_z W)^{k+1} - (u_z W)^{k+1/2}}{\Delta z/2} + \frac{\partial(u_r W)^{k+1}}{\partial r} + \frac{\partial(u_d W)^{k+1/2}}{\partial d} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{b_r}{2} \frac{\partial W}{\partial r} \right)^{k+1} + \frac{\partial}{\partial d} \left( \frac{b_d}{2} \frac{\partial W}{\partial d} \right)^{k+1/2} \quad (30)$$

Здесь  $W^k = W(z = k\Delta z); k = 0, 1, 2, \dots, n_z$  – сеточные слои.

Таким образом, для перехода на следующий сеточный слой по  $z$  необходимо решить краевую задачу, состоящую из обыкновенных дифференциальных уравнений, на каждом из полушагов относительно неизвестных  $W^{k+1/2}$  и  $W^{k+1}$ .

Краевые задачи для выражений (29) и (30) с соответствующими граничными условиями решали методом прогонки [10]. С этой целью использовали сеточную аппроксимацию «против потока», устойчивую независимо от соотношения конвективных и диффузионных членов. Приняли, что  $u_d < 0$ , т.е. от детерминированного воздействия частицы только разрушаются и  $u_r$  способно менять знак.

Окончательная разностная схема и методы ее решения показаны в работе [4]. Там же приведены примеры ее реализации и доказана адекватность модели (28). Использование этой модели повышает точность расчета в два-три раза и, следовательно, при идентификации разделения некоторых агрегатов очистки применение её обязательно.

Скорость изменения размера частиц при детерминированной оценке процессов коагуляции и диспергирования удовлетворительно аппроксимируется выражением  $u_d = K_d d^n$ .

Зависимость для  $b_d$  сложна и неуниверсальна. На неё влияют многие факторы: физико-механические характеристики дисперсной фазы, диспергирующе-

стабилизирующие свойства дисперсионной среды, турбулентность потока, уровень вибрации в агрегатах очистки, предварительная или в период центрифугирования обработка дисперсионной системы ультразвуковыми и другими полями.

Особенно сложна идентификация процесса центрифугирования по показателю  $b_d$  при очистке моторных масел с низкими диспергирующе-стабилизирующими свойствами и гомогенизированных при подготовке к сжиганию тяжелых топлив глубокой переработки нефти [4].

При использовании уравнения (28) эффективность ЦО оценивается по модифицированным формулам (14) – (17) с учетом новых начальных условий и дрейфа размеров частиц в процессе центрифугирования:

$$\varphi_{dz} = 1 - \frac{Q_z + Q_r \int_{r_0}^R u_z W|_{z=H} dr}{F_0(d) Q_z \int_{r_0}^R u_z|_{z=0} dr}; \quad (31)$$

$$\varphi_z = 1 - \frac{Q_z + Q_r \int_0^{d_{max}} \int_{r_0}^R u_z W|_{z=H} dd}{Q_z \int_{r_0}^R u_z|_{z=0} dr}; \quad (32)$$

$$\varphi_{dr} = 1 - \frac{\pi(R^2 - r_0^2)}{Q_r F_0(d)} \int_0^H \left( u_r W - \frac{b_r}{2} \frac{\partial W}{\partial r} \right) |_{r=r_0} dz; \quad (33)$$

$$\varphi_r = 1 - \frac{\pi(R^2 - r_0^2)}{Q_r} \int_0^{d_{max}} \int_0^H \left( u_r W - \frac{b_r}{2} \frac{\partial W}{\partial r} \right) |_{r=r_0} dz dd; \quad (34)$$

$$\varphi_d = \frac{\pi(R^2 - r_0^2)}{F_0(d)(Q_z + Q_r)} \int_0^H \left( u_r W - \frac{b_r}{2} \frac{\partial W}{\partial r} \right) |_{r=R} dz; \quad (35)$$

$$\varphi = \frac{\pi(R^2 - r_0^2)}{Q_z + Q_r} \int_0^{d_{max}} \int_0^H \left( u_r W - \frac{b_r}{2} \frac{\partial W}{\partial r} \right) |_{r=R} dz dd. \quad (36)$$

Для сепаратора начальные условия более просты и  $W_0 = F_0(d)/h$ . Координаты  $z, r$  для этого агрегата трансформируются соответственно в  $x$  и  $y$  (Рис.4). При оценке эффективности сепаратора использованы формулы (31) и (32), в которых  $\pi(R^2 - r_0^2)$  заменена на  $h$  и принято, что  $Q_r = 0, Q_z = Q_c$ . Интегрирование по  $y$  вели в пределах  $0 - h$ .

Скорости потока  $v_{xy}$  в направлении образующей тарелки зависят от  $x$  и  $y$  и имеют сложный профиль (Рис. 7). Большое влияние на неравно-

мерность распределения меридиональной скорости потока  $v_{xy}$  по сечению межтарелочного зазора оказывает критерий  $\lambda = \sqrt{\frac{\omega \sin \alpha}{\mu \rho}}$ , характеризующий соотношение между силами Кориолиса и силами вязкости.

Меридиональную скорость частицы  $u_{xy}$  принимали равной  $v_{xy} - u_x$  и рассчитывали для сепаратора-клорификатора с тарелками без направляющих ребер по формуле

$$u_{xy} = \frac{Q_c}{2\pi Zhx \sin \alpha} \frac{\lambda \left[ sh \lambda \left(1 - \frac{y}{h}\right) \sin \lambda \frac{y}{h} + sh \lambda \frac{y}{h} \sin \lambda \left(1 - \frac{y}{h}\right) \right]}{sh \lambda - \sin \lambda} - \frac{d^2(\rho_d - \rho)g \sin \alpha}{18\mu} \left( \frac{\omega^2 x \sin \alpha}{g} \right)^k. \quad (37)$$

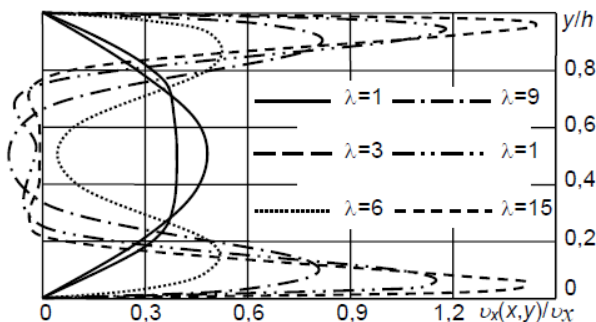


Рис. 7. Профили меридиональной скорости потока в межтарельчатом пространстве сепаратора

Скорость движения по нормали к тарелке, т. е. в направлении оси  $y$ , принимали равной

$$u_y = \frac{d^2(\rho_d - \rho)g \sin \alpha}{18\mu} \left( \frac{\omega^2 x \sin \alpha}{g} \right)^k. \quad (38)$$

В формулах (37) и (38) фактор разделения в отличие от общепринятого подхода взят на основании экспериментальных данных в степени  $k = 0,7 \div 0,9$  [11].

Надежная идентификация стохастичности осуществлена только в направлении оси  $y$

$$\frac{sh \lambda - \sin \lambda + ch \lambda \frac{y_0}{h} \sin \lambda \left(1 - \frac{y_0}{h}\right) + sh \lambda \frac{y_0}{h} \cos \lambda \left(1 - \frac{y_0}{h}\right) - ch \lambda \left(1 - \frac{y_0}{h}\right) \sin \lambda \frac{y_0}{h} - sh \lambda \left(1 - \frac{y_0}{h}\right) \cos \lambda \frac{y_0}{h}}{sh \lambda - \sin \lambda} = 2 \left( \frac{d}{d_{кр}} \right)^2,$$

Анализ полученных результатов (Рис. 8) показывает, что при расчете  $\varphi_d$  необходимо обязательно учитывать распределение меридиональной скорости по высоте межтарельчатого зазора, стохастичность процесса и показатель  $\lambda$ .

Теоретическая кривая, рассчитанная на основе уравнений (28), (37) – (40) дает меньшее квадратичное отклонение экспериментальных точек от неё, чем аппроксимирующая зависимость. Смещение экспериментальных точек в зону  $\frac{d}{d_{кр}} > 1$  указывает на влияние стохастичности, которая при определении  $d_{кр}$  по формуле Бремера [8] не рассматривалась. Кроме того, при сепарировании не учитывалась асимметрия потока жидкости и отставание или опережение его из-за действия силы Кориолиса в окружном направлении.

Реализация и адекватность модели (28) с использованием формул (33) – (36) применительно к ЦО с радиально-осевым сливом показана в работе [4].

Идентификация разделительных процессов при центрифугировании с учетом стохастичности позволяет не только более точно оценивать эффективность ЦО, но и показывает пути совершенствования этих аппаратов. На базе полученных стохастических моделей разработаны теоретические основы расчета и конструирования

$$b_{0y} = 1,6 \cdot 10^{-19} \lambda^{0,41} \left( \frac{\sqrt{g r_{cp}}}{v_{xcp}} \right)^{0,27} \left( \frac{\omega^2 r_{cp}}{g} \right)^{0,74} c_0^{0,32}. \quad (39)$$

Эффективность сепаратора рассчитана с использованием выражений (37), (38), (39) для  $u_{xy}$ ,  $u_y$  и  $b_y$  по модели (28) при  $\lambda = 5, u_d = b_x = b_d = 0$ . Результаты расчета и экспериментального определения  $\varphi_d$  (Рис. 8) представлены в безразмерной форме через диаметр частиц  $d_{кр}$ , полностью осаждаемых на тарелку за один проход суспензии через сепаратор, где

$$d_{кр} = \sqrt{\frac{27 Q_c \mu \operatorname{tg} \alpha}{\pi (\rho_d - \rho) \omega^2 (r_{max}^3 - r_{min}^3)}},$$

где  $r_{max}$  и  $r_{min}$  – максимальный и минимальных радиусы тарелок. На этом же рисунке приведены значения начальной координаты отсева  $y_0/h$  при разных  $\lambda$ , характеризующих положение частицы на входе в межтарельчатое пространство при условии её обязательного удаления.

Параметр  $\varphi_d$  тождествен  $y_0/h$  при использовании детерминированной модели для оценки эффективности сепарирования. Значение  $y_0/h$  рассчитывалось на основе решения уравнения

высокоэффективных центрифуг, сепараторов и гидроциклонов не только судового, но и других назначений. С его помощью созданы принципиально новые направления инженерного оформления систем топливоподготовки и маслоочистки в ДВС [11] и оценена эффективность их в судовых дизелях [4].

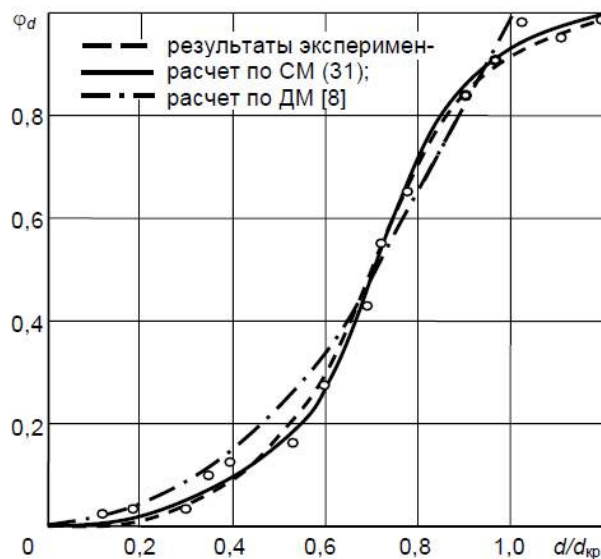


Рис. 8. Зависимость безразмерной координаты отсева от относительного диаметра частиц ДФ

Разработаны более 10 модификаций ЦО с улучшенными эксплуатационными характеристиками, значительно интенсифицирующих процессы очистки ГСМ при минимальных энергозатратах и металлоемкости и трудоемкости обслуживания агрегатов очистки [11]. Предложенные методы расчета могут использоваться при оценке технологических показателей процессов осветления, сгущения и классификации дисперсных систем в двигателестроении и других отраслях народного хозяйства.

### Выводы

Разработаны со стохастическим подходом новые модели очистки топлив и масел, новизна которых состоит в учёте сложной гидродинамической обстановки в объёме центробежного аппарата осаждения дисперсной фазы рассмотрением действия на нерастворимые частицы загрязнений не только инерционной, но и кориолисовой сил и влияния на их отфуговывание поля скоростей и локальности потока в осевом или меридиональном направлениях. Стохастическое моделирование центрифугирования (циклонирования) и

тонкослойного сепарирования выполнено с учётом диспергирования и коагуляции частиц неустойчивой дисперсной фазы, идентификации случайных воздействий на осаждение и вызывающих изменение дисперсного состава загрязнений.

Выявлена целесообразность стохастического моделирования процесса центрифугирования при разделении сложных дисперсионных систем численными, в частности сеточными, методами, которые просты в программировании и обеспечивают безусловную устойчивость и консервативность решения задач очистки топлив и масел.

Установлено, что большинство краевых задач центрифугирования, циклонирования и сепарирования рационально решать по конечно-разностной схеме путём прогона с аппроксимацией «против потока», устойчивой независимо от соотношения конвективных и диффузионных членов уравнения Колмогорова – Фоккера – Планка. Для расчёта систем с разрушаемой дисперсной фазой оптимален метод контрольного объёма, так как он позволяет соблюсти баланс вероятности в условиях отфуговывания загрязнений с изменяющимся дисперсным составом.

### Литература

1. Кича Г. П. Теоретические основы расчета и интенсификации очистки топлив и масел в ДВС фильтрованием // Двигателестроение. 1986. № 5. С. 25–29.
2. Воробьев Б. Н., Надежкин А. В., Кича Г. П. Стохастическое моделирование разделения сложных гетерогенных систем судовых устройств на основе представлений и аппарата случайных марковских процессов // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 3. Т.2. С. 112–121.
3. Непомнящий Е. А. Кинетика некоторых процессов переработки дисперсных материалов // Теоретические основы химической технологии. 1973. № 5. С. 754–763.
4. Кича Г.П. Новые стохастические модели процесса очистки горюче–смазочных материалов в ДВС // Двигателестроение. 1989. № 11. С. 18–23.
5. Михлин С. Г. Вариационные методы в математической физике. – М.: Наука, 1970. 512 с.
6. Петровский И. Г. Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Наука, 1964. 272 с.
7. Крылов В. И., Бобков В. В., Монастырский П.И. Вычислительные методы. – М.: Наука, 1976. 304 с.
8. Романков П. Г., Плюшкин С. А. Жидкостные сепараторы.– Л.: Машиностроение, 1976. 256 с.
9. Кича Г.П., Надежкин А. В., Перминов Б.Н. Расчет эффективности очистки горюче смазочных материалов на судах циклонированием // Транспортное дело России. 2006. Вып. 7. С. 86–89.
10. Самарский А. А., Николаев Е. С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. 592 с.
11. Кича Г.П. Очистка масла в двигателях внутреннего сгорания // Химия и технология топлив и масел. 1985. № 2. С. 28–30.

### References

1. Kicha G. P. Teoreticheskie osnovy` rascheta i intensivifikacii ochistki topliv i masel v DVS fil'trovaniem // Dvigatelistroenie. 1986. № 5. S. 25–29.
2. Vorob`ev B. N., Nadezhkin A. V., Kicha G. P. Stokhasticheskoe modelirovanie razdeleniya slozhny`x geterogenny`x sistem sudovy`x ustrojstv na osnove predstavlenij i apparata sluchajny`x markovskix processov // Morskije intellektual`ny`e tehnologii. 2017. № 3. T.2. S. 112–121.
3. Nepomnyashhij E. A. Kinetika nekotory`x processov pererabotki dispersny`x materialov // Teoreticheskie osnovy` ximicheskoi tehnologii. 1973. № 5. S. 754–763.
4. Kicha G.P. Novy`e stokhasticheskie modeli processa ochistki goryuche–smazochny`x materialov v DVS // Dvigatelistroenie. 1989. № 11. S. 18–23.
5. Mixlin S. G. Variacionny`e metody` v matematicheskoi fizike. – M.: Nauka, 1970. 512 s.
6. Petrovskij I. G. Lekcii po teorii oby`knovenny`x differencial`ny`x uravnenij. – M.: Nauka, 1964. 272 s.
7. Kry`lov V. I., Bobkov V. V., Monasty`rskij P.I. Vy`chislitel`ny`e metody`. – M.: Nauka, 1976. 304 s.
8. Romankov P. G., Plyushkin S. A. Zhidkostny`e separatory`. – L.: Mashinostroenie, 1976. 256 s.
9. Kicha G.P., Nadezhkin A. V., Perminov B.N. Raschet e`ffektivnosti ochistki goryuche smazochny`x materialov na sudax ciklonirovaniem // Transportnoe delo Rossii. 2006. Vy`p. 7. S. 86–89.
10. Samarskij A. A., Nikolaev E. S. Metody` resheniya setochny`x uravnenij. – M.: Nauka, 1978. 592 s.
11. Kicha G.P. Ochistka masla v dvigatelyax vnutrennego sgoraniya // Ximiya i tehnologiya topliv i masel. 1985. № 2. S. 28–30.



УДК 621.431.74.016

## ЛОКАЛЬНЫЕ ОПТИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЗУЛЬТИРУЮЩИЕ ПОТОКИ ИЗЛУЧЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

**Борис Иванович Руднев**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Холодильной техники, кондиционирования и теплотехники  
Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет  
690087, Владивосток ул. Луговая, 52б  
тел.+7(908) 447-00-49, e-mail: povalichina@mail.ru

**Ольга Владимировна Повалихина**

доцент  
доцент кафедры Холодильной техники, кондиционирования и теплотехники  
Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет  
690087, Владивосток ул. Луговая, 52б  
тел. +7(904) 628-82-47, e-mail: povalichina@mail.ru

### Аннотация

Оценка теплового состояния деталей, образующих камеру сгорания судовых дизелей, на стадии их проектирования и доводки представляет собой весьма трудную и еще пока нерешенную проблему. Это обусловлено как сложностью физических процессов, протекающих в камере сгорания, так и несовершенством математических моделей, используемых для их описания. Отмеченное в полной мере относится и к процессам локального радиационного теплообмена. Доля последнего в суммарном теплообмене для судовых дизелей доходит до 45 – 50% по мгновенным значениям по 20 – 25% по средним за рабочий цикл. Изменение оптико-геометрических характеристик радиационного теплообмена по углу поворота коленчатого вала и сложная геометрия поверхностей деталей камеры сгорания значительно увеличивают трудности, связанные с применением зонального метода для расчета локальных потоков излучения. В статье предложен метод расчета геометрических угловых коэффициентов излучения, отличающейся возможностью определения как средних для всей поверхности теплообмена (например, для крышки цилиндра или поршня), так и локальных значений указанных параметров. Представлены локальные значения геометрических угловых коэффициентов излучения и локальные результирующие радиационные тепловые потоки в функции угла поворота коленчатого вала для поршня и крышки цилиндра судового дизеля 6 ЧН 24/36.

**Ключевые слова:** судовой дизель, теплообмен излучением, камера сгорания, локальный угловой коэффициент

## THE LOCAL OPTICAL-GEOMETRICAL DATA AND RESULTING RADIATION HEAT FLUXES IN MARINE DIESEL COMBUSTION CHAMBER

**Boris I. Rudnev**

professor, Dr. Sci. Tech.,  
Professor of department of Refrigeration equipment,  
conditioning and heat transfer  
Far Eastern State Technical Fisheries University  
52B, Lugovaya str., Vladivostok, 690087, Russia  
tel.+7(908) 447-00-49, e-mail: povalichina@mail.ru

**Olga V. Povalikhina**

associate professor  
Associate professor of department of Refrigeration equipment,  
conditioning and heat transfer  
Far Eastern State Technical Fisheries University  
52B, Lugovaya str., Vladivostok, 690087, Russia  
tel. +7(904) 628-82-47, e-mail: povalichina@mail.ru

### Abstract

Estimation of thermal condition of details including a marine diesel combustion chamber at the stage of its designing and operational development represented itself nearly difficult and unsolved problem. It is due to complicated physical processes following in the combustion chamber and unimproved mathematical models used for the description. The mentioned problem is concerned to the processes of local radiation heat transfer. A part of local radiation heat transfer in total heat transfer for marine diesels reaches 45 – 45% according to instantaneous values 20 – 25% according to medium for working cycle. Change of optical-geometrical data radiation heat transfer for crank angle degree and complicated geometry of surfaces of combustion chamber details increases complications by far connected with application of zonal method for calculation of local fluxes radiation heat transfer. Method of calculation

for geometrical angle coefficients radiation differing from chance of estimation as medium for the whole surface of heat transfer (for example for head of cylinder or piston) and local values indicated parameters is proposed in this paper. The local values of geometrical angle coefficients and local resulting radiation heat fluxes in function of crank angle degree for piston and head of cylinder in marine diesel 6 ChN 24/36 is given.

**Key words:** marine diesel, radiation heat transfer, combustion chamber, local angle coefficient

**Введение**

Определение теплового состояния деталей, образующих камеру сгорания (КС), судовых дизелей на стадии их проектирования и доводки представляет собой трудную и еще пока нерешенную проблему. Это обусловлено сложностью физических процессов, протекающих в КС, и несовершенством математических моделей (ММ), используемых для их описания. Отмеченное в полной мере относится и к процессам локального теплообмена, в том числе и радиационного. Доля последнего в суммарном теплообмене для судовых дизелей доходит до 45 – 50% по мгновенным значениям и 20 – 25% по средним значениям за рабочий цикл [1].

Изменение оптико-геометрических характеристик радиационного теплообмена по углу поворота коленчатого вала и «нестандартная» геометрия поверхностей деталей КС значительно увеличивают трудности, связанные с применением зонального метода для расчета локальных потоков излучения. В частности, предлагаемые для расчета геометрических угловых коэффициентов излучения методы, основанные на аппроксимации реальной геометрии КС классическими элементами (цилиндры, кольца и др.) [2], не позволяют с достаточной точностью определять локальные значения указанных коэффициентов. Это приводит как следствие к тому, что невозможно с помощью таких подходов определить и локальные результирующие потоки излучения, воспринимаемые деталями КС.

**1. Метод расчета геометрических угловых коэффициентов излучения**

В рамках настоящей статьи предлагается метод расчета геометрических угловых коэффициентов излучения, отличающейся от ранее предложенных [2] возможностью определения как средних для всей поверхности теплообмена (например, для крышки цилиндра, втулки и др.), так и локальных значений указанных параметров. Сущность предлагаемого метода расчета сводится к следующему.

Угловой коэффициент для поверхности F отличается (Рис. 1) от телесного угла, под которым видна эта поверхность лишь множителем 1/4π.

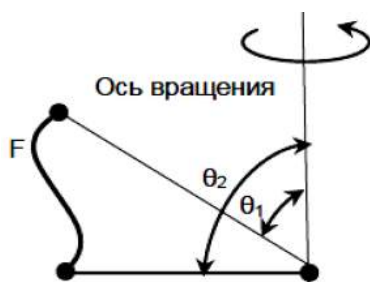


Рис. 1. Схема к определению геометрического углового коэффициента излучения

Угловой коэффициент для поверхности F определяется решением уравнения

$$\frac{1}{4\pi}\Omega(F) = \varphi(F), \tag{1}$$

где  $\Omega(F)$  – телесный угол;  $\varphi(F)$  – угловой коэффициент; F – элемент поверхности вращения.

В случае судового дизеля 6 ЧН 24/36 F представляет собой элемент поверхности сферической выемки в поршне. Телесный угол для F можно вычислить по формуле

$$\Omega(F) = 2\pi(\cos\theta_2 - \cos\theta_1), \tag{2}$$

Соответственно угловой коэффициент может быть определен по зависимости

$$\varphi(F) = \frac{1}{2}(\cos\theta_2 - \cos\theta_1), \tag{3}$$

где  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – полярные углы, отсчитываемые от оси вращения.

Рассмотрим поверхность, образованную кривой  $P_0P_n$  при вращении ее вокруг оси (см. рис. 2).

Пусть  $\theta_k$  – полярный угол точки  $P_k$ , т.е. угол между лучом  $OP_k$  и осью вращения. Угол  $\theta_k$  отсчитывается против часовой стрелки. Тогда угловой коэффициент для сегмента поверхности, образованного отрезком  $P_{k+1}, P_k$ , находим по формуле

$$\varphi(P_{k+1}, P_k) = \frac{1}{2}(1 - \cos\theta_{k+1}) - \frac{1}{2}(1 - \cos\theta_k). \tag{4}$$

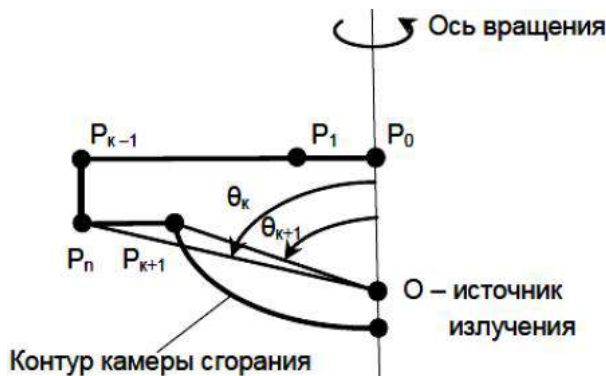


Рис.2. К расчету геометрических угловых коэффициентов излучения применительно к открытой камере сгорания судового дизеля 6ЧН 24/36.

Указанный коэффициент может получиться отрицательным. Это означает, что сегмент  $P_{k+1}, P_k$  находится в тени. В этом случае нужно изменить ранее вычисленный коэффициент  $\varphi(P_k, P_{k-1})$ , прибавив к нему отрицательную величину  $\varphi(P_{k+1}, P_k)$ , а  $\varphi(P_{k+1}, P_k)$  положить равным нулю. Предыдущий угловой коэффициент был уменьшен, поскольку в данном случае сегмент  $P_kP_{k-1}$  частично затеняется сегментом  $P_{k+1}P_k$ .

В итоге, схема расчета геометрических угловых коэффициентов излучения может быть представлена следующим образом:

1. Вычисляем декартовы координаты всех точек  $P_1, \dots, P_n$ .
2. Пересчитываем декартовы координаты в полярные (нужны только значения полярных углов  $\theta_k$ ).
3. Вычисляем геометрические угловые коэффициенты излучения по формуле (4) для всех  $k$ .
4. Проверяем нет ли отрицательных коэффициентов, если они есть, то угловые коэффициенты модифицируются с учетом того находится ли соответствующий сегмент в тени или нет.

Затем шаги 1 – 4 выполняются для каждого значения угла поворота коленчатого вала  $\alpha$ .

Использование рассмотренной выше методики для определения локальных геометрических угловых коэффициентов излучения позволило получить соответствующие зависимости для сферической выемки в поршне и для крышки цилиндра судового дизеля 6ЧН 24/36. Указанные зависимости представлены на рис. 3 и 4.

Анализ показывает, что наибольшее значение угловых коэффициентов приходится на кромку сферической выемки в поршне. Из практики эксплуатации судовых дизелей известно, что именно в этих локальных зонах чаще всего возникают термические трещины и наблюдается явление «выгорания» поверхностного слоя металла поршня. Зависимости, представленные на графике (Рис. 4) подтверждают, что наиболее нагруженной потоками излучения оказывается центральная часть крышки цилиндра. Для исследованного авторами статьи судового дизеля 6ЧН 24/36 в центральной части огневой поверхности крышки цилиндра располагается межклапанная перемычка и отверстие для установки форсунки, которые уже сами по себе являются концентраторами напряжений.

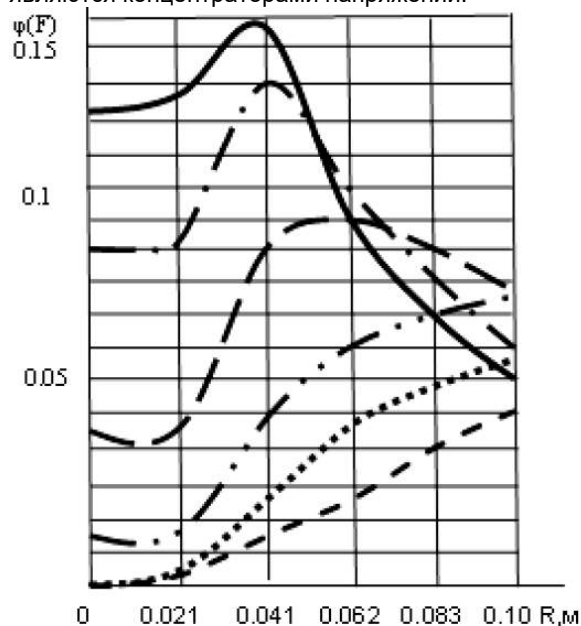


Рис.3. Изменение геометрического углового коэффициента излучения для сферической выемки в поршне судового дизеля 6ЧН 24/36. Условные обозначения:

- для ВМТ;
- · — · —  $\alpha=20^\circ$  ПКВ после ВМТ;
- · · —  $\alpha=40^\circ$  ПКВ после ВМТ;
- · · · —  $\alpha=60^\circ$  ПКВ после ВМТ;
- · · · · —  $\alpha=80^\circ$  ПКВ после ВМТ;
- · · · · —  $\alpha=100^\circ$  ПКВ после ВМТ.

Неудивительно, что в практике эксплуатации судовых дизелей [1], именно в этой части крышки цилиндра возникают термические трещины. В наиболее благоприятных с точки зрения тепловых нагрузок, обусловленных потоками излучения, находится втулка цилиндра.

Несмотря на высокое значение геометрических угловых коэффициентов излучения (0,1 – 0,65), уровень радиационных тепловых потоков, оказывается незначительным, так как в период активного тепловыделения в камере сгорания (ВМТ – 40° ПКВ после ВМТ) поверхность втулки цилиндра закрыта поршнем.

Необходимо также учитывать и тот факт, что поверхность втулки цилиндра имеет степень черноты в пределах  $0,3 \div 0,4$ , а поверхности поршня и крышки цилиндров  $0,9 \div 0,95$ .

## 2. Результирующие потоки излучения в камере сгорания

Сопоставление расчетных данных по локальным геометрическим угловым коэффициентам излучения, представленных на рис. 3 – 4 и экспериментальных данных по локальным тепловым потокам излучения [1] позволяет сделать вывод о наличии корреляционной связи между характером изменения угловых коэффициентов излучения и тепловым состоянием деталей, образующих КС судового дизеля.

Для примера на графиках (Рис. 5 и 6) показаны локальные результирующие потоки излучения, рассчитанные для поршня судового дизеля 6 ЧН 24/36 с использованием предлагаемой методики. Расхождения полученных результатов с известными экспериментальными данными [1, 3 – 10] составляет 10 – 12%, что подтверждает адекватность предложенного расчетного метода по определению локальных геометрических коэффициентов излучения.

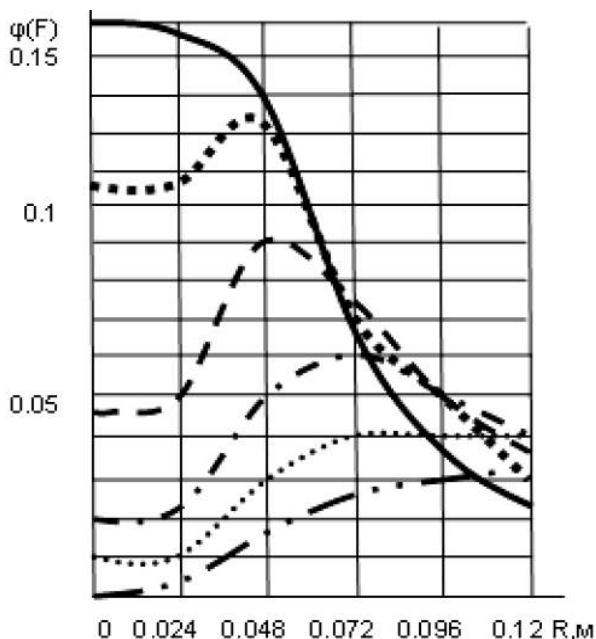


Рис.4. Изменение геометрического углового коэффициента излучения для крышки цилиндра судового дизеля 6ЧН 24/36. Условные обозначения:

- для ВМТ;
- $\alpha=20^\circ$  ПКВ после ВМТ;
- - -  $\alpha=40^\circ$  ПКВ после ВМТ;
- . . -  $\alpha=60^\circ$  ПКВ после ВМТ;
- $\alpha=80^\circ$  ПКВ после ВМТ;
- . . -  $\alpha=100^\circ$  ПКВ после ВМТ

**Заключение**

Использование детально развитого в теплофизике зонального метода расчета теплообмена излучением применительно к камере сгорания судового дизеля ограничивается отсутствием надежных данных по оптико-геометрическим и энергетическим характеристикам. Предложенный в статье метод расчета локальных геометрических коэффициентов излучения позволяет преодолеть эту трудность.

Полученные расчетные значения результирующих потоков излучения находятся в хорошем соответствии с известными экспериментальными данными. Это позволяет применять указанный метод на стадии проектирования современных судовых дизелей и решать ряд вопросов, связанных с повышением их эксплуатационной надежности.

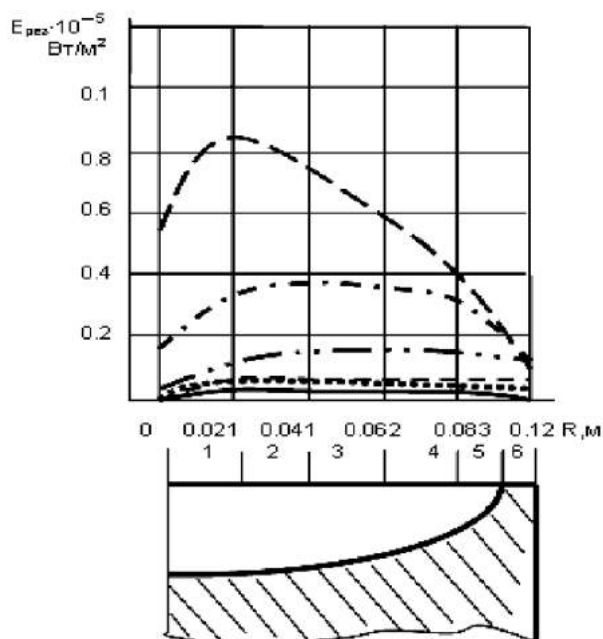


Рис.5. Результирующий поток излучения на поршень по радиусу при нагрузке 100%: 1 – зона 1; 2 – зона 2; 3 – зона 3; 4 – зона 4; 5 – зона 5; 6 – кольцо:

- для ВМТ;
- - -  $\alpha=20^\circ$  ПКВ после ВМТ;
- . . -  $\alpha=40^\circ$  ПКВ после ВМТ;
- . . -  $\alpha=60^\circ$  ПКВ после ВМТ;
- - -  $\alpha=80^\circ$  ПКВ после ВМТ;
- $\alpha=100^\circ$  ПКВ после ВМТ

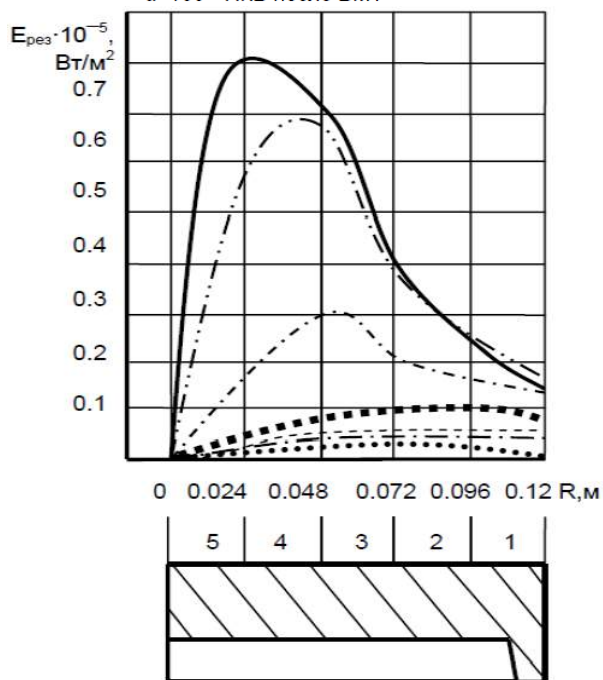


Рис.6. Результирующий поток излучения на крышку цилиндра по радиусу при нагрузке 100%: 1 – зона 1; 2 – зона 2; 3 – зона 3; 4 – зона 4; 5 – зона 5:

- для ВМТ;
- . . -  $\alpha=10^\circ$  ПКВ после ВМТ;
- . . -  $\alpha=20^\circ$  ПКВ после ВМТ;
- - -  $\alpha=40^\circ$  ПКВ после ВМТ;
- $\alpha=60^\circ$  ПКВ после ВМТ;
- - -  $\alpha=80^\circ$  ПКВ после ВМТ;
- . . -  $\alpha=100^\circ$  ПКВ после ВМТ

## Литература

1. Петриченко, Р.М. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: Алгоритмы прикладных программ / Р.М. Петриченко, С.А. Батулин, Ю.Н. Исаков и др. /под ред. Р.М. Петриченко. – Л.: Машиностроение, 1990. 328 с.
2. Кучеров, В.Н. Метод расчета геометрических угловых коэффициентов излучения в камере сгорания судового малооборотного дизеля / В.Н. Кучеров // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2017. №3-4. С. 149 – 152.
3. Flynn, P. An experimental determination of the instantaneous potential radiant heat transfer within an operating Diesel engine /P. Flynn, M. Mizusawa, O.A. Uyehara et al. // SAE Preprints. 1972. No. 720022. 32 p.
4. Dent, J.C. Convective and radiative heat transfer in a high swirl direct injection diesel engine / J.C. Dent, S.I. Siluman // SAE Preprints, 1977. N. 770047. 26 p.
5. Руднев, Б.И. Оптические параметры частиц сажи и энергетические характеристики радиационного теплообмена в камере сгорания дизельного двигателя /Б.И. Руднев, О.В. Повалихина // Тепловые процессы в технике. 2013. Т.5, №10. С. 476 – 480.
6. Руднев, Б.И. Особенности расчета оптико-геометрических характеристик теплообмена излучением в камере сгорания дизельного двигателя /Б.И. Руднев, О.В. Повалихина // Тепловые процессы в технике. 2015. Т.7, №2. С. 87– 91.
7. Руднев, Б.И. Оптико-геометрические характеристики радиационного теплообмена в камере сгорания дизеля / Б.И. Руднев, О.В. Повалихина // Journal of Advanced Research in Technical Science, North Charleston, USA, 2018, Issue 9-1. – P. 187 – 191.
8. Руднев, Б.И. Оптические параметры частиц сажи и энергетические характеристики радиационного теплообмена в камере сгорания дизельного двигателя /Б.И. Руднев, О.В. Повалихина // Тепловые процессы в технике. 2013. Т.5, №10. С. 476 – 480.
9. Kamimoto, T. Particulate formation and flame structure in diesel engines / T. Kamimoto, M. Yagita // SAE Preprints. 1989. N. 890436. – 9p.
10. Зигель, Р. Теплообмен излучением /О. Зигель, Дж. Хауэлл – М.: Мир, 1975. 934 с.

## References

1. Petrichenko, R.M. EElementy sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya DVS: Algoritmy prikladnykh programm / R.M. Petrichenko, S.A. Baturin, YU.N. Isakov i dr. /pod red. R.M. Petrichenko. – L.: Mashinostroenie, 1990. 328 s.
2. Kucherov, V.N. Metod rascheta geometricheskikh uglovykh koehffitsientov izlucheniya v kamere sgoraniya sudovogo malooborotnogo dizelya / V.N. Kucherov // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2017. №3-4. S. 149 – 152.
3. Flynn, P. An experimental determination of the instantaneous potential radiant heat transfer within an operating Diesel engine /P. Flynn, M. Mizusawa, O.A. Uyehara et al. // SAE Preprints. 1972. No. 720022. 32 p.
4. Dent, J.C. Convective and radiative heat transfer in a high swirl direct injection diesel engine / J.C. Dent, S.I. Siluman // SAE Preprints, 1977. N. 770047. 26 p.
5. Rudnev, B.I. Opticheskie parametry chastits sazhi i ehnergeticheskie kharakteristiki radiatsionnogo teploobmena v kamere sgoraniya dizel'nogo dvigatelya /B.I. Rudnev, O.V. Povalikhina // Teplovye protsessy v tekhnike. 2013. T.5, №10. S. 476 – 480.
6. Rudnev, B.I. Osobennosti rascheta optiko-geometricheskikh kharakteristik teploobmena izlucheniem v kamere sgoraniya dizel'nogo dvigatelya /B.I. Rudnev, O.V. Povalikhina // Teplovye protsessy v tekhnike. 2015. T.7, №2. S. 87– 91.
7. Rudnev, B.I. Optiko-geometricheskie kharakteristiki radiatsionnogo teploobmena v kamere sgoraniya dizelya / B.I. Rudnev, O.V. Povalikhina // Journal of Advanced Research in Technical Science, North Charleston, USA, 2018, Issue 9-1. – R. 187 – 191.
8. Rudnev, B.I. Opticheskie parametry chastits sazhi i ehnergeticheskie kharakteristiki radiatsionnogo teploobmena v kamere sgoraniya dizel'nogo dvigatelya /B.I. Rudnev, O.V. Povalikhina // Teplovye protsessy v tekhnike. 2013. T.5, №10. S. 476 – 480.
9. Kamimoto, T. Particulate formation and flame structure in diesel engines / T. Kamimoto, M. Yagita // SAE Preprints. 1989. N. 890436. – 9p.
10. Zigel', R. Teploobmen izlucheniem /O. Zigel', Dzh. Khauehll – М.: Mir, 1975. 934 s.

УДК 629.12.002 + 620.9

## ВЫБОР ХЛАДАГЕНТА ДЛЯ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ НА СУДАХ

**Александр Владиславович Волынцев**

аспирант кафедры Судовые двигатели внутреннего сгорания  
Морской государственной университет им. Адм. Г.И. Невельского  
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а  
тел. 8 (984) 190-26-85; e-mail: gold125@list.ru

**Анатолий Николаевич Соболенко**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры Судовые двигатели внутреннего сгорания  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а  
тел.: 8 (950) 286-57-03; e-mail: sobolenko\_a@mail.ru

### Аннотация

Цель статьи – произвести анализ между четырьмя хладагентами, для работы теплонасосной паропроизводящей установки (ТНПУ) на судах с переменным режимом главной судовой установки. Наиболее сложным и плохо предсказуемым в эксплуатации, является судно с переменным режимом работы главной судовой установки – промышленное, из-за постоянной потребности в паре и отсутствием источника НПТ с постоянной температурой. Для определения наиболее эффективного в качестве хладагента газа для ТНПУ выполнен расчёт удельной массовой холодопроизводительности. Газ с наименьшими значениями показателей будет более эффективным. Для сравнения разных хладагентов использованы следующие параметры -  $q_0$  - удельная массовая холодопроизводительность  $\varepsilon$  - холодильный коэффициент цикла. Для сопоставимости результатов расчётов принимаем температуру кипения  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  и температуру конденсации  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$  одинаковыми для четырёх вариантов расчётов. Для получения параметров агента в расчётных точках пользуясь s-T или i-Lg p диаграммами и таблицами насыщенных паров. В результате выполненных расчётов и последующего анализа, установлено, что применение природного газа и бутана в качестве хладагентов для ТНПУ, является весьма перспективным.

**Ключевые слова:** тепловая насосная паропроизводящая установка, газ, топливо, главная судовая установка

## ADOPTION OF THE REFRIGERANT WHEN USING WASTE HEAT IN THE SHIP HEAT PUMPING UNITS

**Aleksandr V. Volyntsev**

Postgraduate of department of Ship power installations,  
Maritime state university named Admiral Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: 8(984)190-26-85; e-mail: Gold125@list.ru

**Anatoly N. Sobolenko**

Professor, Dr.Sci.Tech.,  
Professor of department of Ship power installations,  
Maritime state university named Admiral Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: 8 (950) 286-57-03; e-mail: sobolenko\_a@mail.ru

### Abstract

The purpose of the article is to analyze four most suitable refrigerants for the operation of the heat pump steam generating plants (HPSGP) on vessels with a variable operating mode of the main engine, and to show the factor that has a major influence on the operation of the HPSGP on ships with a variable operating mode of the main engine. A vessel with a variable operating mode of the main ship installation – a fishing ship is the most difficult and unlikely to operate due to the constant need for steam and absence of a source of low potential heat with a constant temperature. The main factor affecting the operation of HPSGP on vessels with variable operating mode is the supply of heat to the evaporators. The amount of heat supplied to the evaporator should not be critically altered during the voyage. The maximum range of changes is up to 8% of the total amount of heat supplied. The most effective refrigerant should be with a low cooling capacity and a low cooling coefficient, as they allow to demonstrate the maximum operation of the HPSGP on the condenser. The comparison was performed for four refrigerants: Freon F113, helium (He) methane ( $\text{CH}_4$ ), butane ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ). The calculations showed that the most effective gases are butane ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), and methane ( $\text{CH}_4$ ). For operation at high temperatures a more stable refrigerant is preferable – methane ( $\text{CH}_4$ ). For a more correct adoption the additional information of gas performance properties is required. For the operation of HPSGP on ships of the gas carrier type, it is possible to use natural gas, as more than 93% of the natural gas composition is methane,



and the thermodynamic characteristics of natural gas are mainly determined by the characteristics of methane. The use of natural gas as a refrigerant became possible with the advent of new high-quality equipment and trained qualified specialists in the operation of the natural gas installation.

**Key words:** heat pumping steam generating plant, gas, fuel, main ship installation

### Введение

Вопросу утилизации тепловой энергии на судах уделяется достаточно большое внимание [1]. Одним из направлений в развитии технологий энергосбережения для ведущих стран мира является разработка и внедрение технологических решений с использованием теплонасосных паропроизводящих установок (ТПНУ) с целью более полного использования низкопотенциальной теплоты [2].

В статьях [3,4,5,6] было проанализировано применение ТПНУ на судах для получения высокопотенциальной теплоты.

Основной фактор влияющий на работу ТПНУ на судах с переменным режимом работы, является подвод тепла на испарители. Количество тепла, подводимое к испарителю не должно критически меняться в течении рейса. Максимальный диапазон изменений до 8% от общего количества подведенного тепла.

Наиболее сложным и маловероятным в эксплуатации, является судно с переменным режимом работы главной судовой установки – промышленное, из-за постоянной потребности в паре (на опреснительную установку, на РМУ, на подогрев танков, в зимний период на оттаивание льда на палубе). Постоянные траления, переходы на новое место промысла и работа рефрижераторных установок сильно нагружают судовой ДВС из-за чего постоянно меняется температура охлаждающей воды на выходе из него от 60 - 90°C. Такой большой перепад температуры не будет давать нужного количество тепла на испаритель ТПНУ.

Проведенные расчеты и исследования на судах промышленного флота типа Большой Автономный Траулер-морозильный (БАТМ) проекта 1288 показали, что применение ТПНУ на данном этапе не целесообразно о следующим причинам.

Во-первых, для получения от источника высокопотенциального тепла (ВПТ) рабочего количества пара, должен быть один режим работы источника низкопотенциального тепла (НПТ) с рабочей температурой 80°C. Данным источником на судне может являться только судовая энергетическая установка. Но в процессе промысла температура охлаждающей воды главной судовой

установки меняется постоянно от 60 до 90°C (в летнее и зимнее время в Беринговом море).

Эти перепады температуры НПТ не позволяют постоянно выдавать пар нужной температуры от источника ВПТ.

Во-вторых, недостаточно изучено применение новых видов хладагентов [7]. Хладагент типа R113, наиболее изученный, способен конденсироваться при температуре +60°C, должен быть выведены из производства к 2030 г. (согласно Монреальскому протоколу) [8]. Другие хладагенты, более предпочтительные из-за их более хороших характеристик [9,10] теплопроводности, температуры кипения, удельной теплоёмкости и др., гелий (He), природный газ (CH<sub>4</sub>), бутан (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) – еще не до конца изучены.

Для определения подходящего газа для ТПНУ нужно найти удельную массовую холодопроизводительность, газ с наименьшими показателями будет более эффективным

Для сравнения следует использовать следующие параметры  $\varphi_0$ ,  $\varepsilon$  которые характеризуют удельную массовую холодопроизводительность и холодильный коэффициент цикла.

Для сопоставимости результатов расчётов принимаем температуру кипения 60 °C и температуру конденсации 130 °C одинаковыми для четырёх вариантов расчётов.

Для получения параметров агента в расчётных точках пользуясь  $s-T$  или  $i-Lg p$  диаграммами и таблицами насыщенных паров.

Особенно хотелось бы выделить природный газ, его низкая стоимость и высокая теплоёмкость, позволила бы с легкостью его использовать в ТНУ в качестве хладагента на судах типа газозавозы или на судах с газотопливной системой.

Гелий же с свою очередь благодаря низкой температуре кипения мог бы использоваться, в ТНУ, в качестве хладагента, на судах типа танкер и атомоход.

### 1. Расчёты ТПНУ с четырьмя типами хладагентов

Для расчета были выбраны четыре хладагента: Ф113, He, CH<sub>4</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>.

Для работы ТПНУ был выбран цикл, указанный на схеме (Рис. 1).

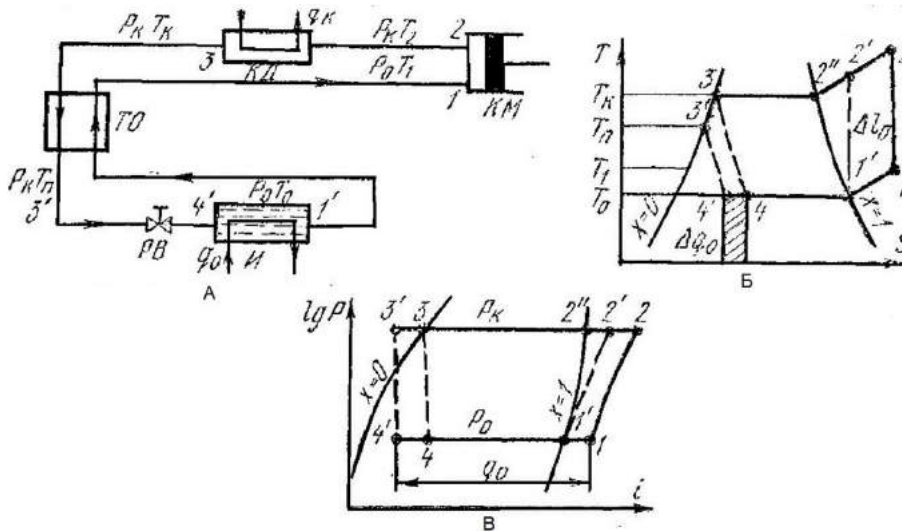


Рис. 1. Цикл, принципиальная схема ТНПУ А-принципиальная схема Б-цикл в диаграмме s-T, В- цикл в диаграмме i-Lg p

Расчет регенеративного цикла трехступенчатой теплонасосной установки при использовании холодильного агента – хладон Ф113. Принимаем температуру кипения агента  $t_0 = +60^\circ\text{C}$  и температуру конденсации  $t_k = +130^\circ\text{C}$ . Обозначение точек цикла соответствует рисунку 1. Пользуясь диаграммой и таблицами насыщенных паров хладона – Ф113 [11], определяем параметры, необходимые для расчета.

Энтальпия сухого насыщенного пара, выходящего из испарителя  $i'_1 = 415$  кДж/кг.

Энтальпия засасываемого компрессором перегретого пара  $i_1 = 418$  кДж/кг

Энтальпия перегретого пара в конце сжатия  $i_2 = 465$  кДж/кг.

Энтальпия жидкого холодильного агента, выходящего из конденсатора  $i_3 = 405$  кДж/кг.

Энтальпия переохлажденного жидкого холодильного агента.

$$i'_3 = i_3 - (i_1 - i'_1) = 405 - (418 - 415) = 402 \text{ кДж/кг}$$

Энтальпия переохлажденного жидкого холодильного агента  $i'_3 = i'_4 = 402$  кДж/кг

Удельная массовая холодопроизводительность  $q_0 = i_1 - i'_4 = 418 - 402 = 16$  кДж/кг.

Теоретическая работа сжатия

$$l_0 = i_2 - i_1 = 465 - 418 = 47 \text{ кДж/кг}$$

Теплота, отведенная от холодильного агента в конденсаторе  $q_k = i_2 - i_3 = 60$  кДж/кг.

Теплота, отведенная в процессе переохлаждения  $q_n = i_3 - i'_3 = 405 - 402 = 3$  кДж/кг.

Холодильный коэффициент цикла  $\epsilon = q_0/l_0 = 16/47 = 0,34$ .

Расчет регенеративного цикла трехступенчатой теплонасосной установки. Холодильный агент – гелий. Температура кипения  $t_0 = +60^\circ\text{C}$ . Температура конденсации  $t_k = +130^\circ\text{C}$ . Обозначение точек цикла соответствует рисунку 1. Пользуясь диаграммой и таблицами насыщенных паров хладона – Не [12], определяем параметры, необходимые для расчета.

Энтальпия сухого насыщенного пара, выходящего из испарителя  $i'_1 = 3342,32$  кДж/кг ( $87^\circ\text{C}$ ).

Энтальпия засасываемого компрессором перегретого пара  $i_1 = 3347,51$  кДж/кг ( $88^\circ\text{C}$ ).

Энтальпия перегретого пара в конце сжатия

$$i_2 = 3565,62 \text{ кДж/кг (} 130^\circ\text{C)}.$$

Энтальпия жидкого холодильного агента, выходящего из конденсатора

$$i_3 = 3257,9 \text{ кДж/кг (} 90^\circ\text{C)}.$$

Энтальпия переохлажденного жидкого холодильного агента

$$i'_3 = i_3 - (i_1 - i'_1) = 3257,9 - (3347,51 - 3342,32) = 3252,71 \text{ кДж/кг.}$$

Энтальпия переохлажденного жидкого холодильного агента  $i'_3 = i'_4 = 3252,71$  кДж/кг.

Удельная массовая холодопроизводительность  $q_0 = i_1 - i'_4 = 3347,51 - 3252,71 = 94,8$  кДж/кг.

Теоретическая работа сжатия

$$l_0 = i_2 - i_1 = 3565,62 - 3347,51 = 218,11 \text{ кДж/кг.}$$

Теплота, отведенная от холодильного агента в конденсаторе  $q_k = i_2 - i_3 = 411,58$  кДж/кг.

Теплота, отведенная в процессе переохлаждения.

$$q_n = i_3 - i'_3 = 3565,62 - 3252,71 = 312,91 \text{ кДж/кг.}$$

Холодильный коэффициент цикла

$$\epsilon = \frac{q_0}{l_0} = 0,3 \quad \epsilon = q_0/l_0 = 94,81/218,11 = 0,43.$$

Расчет регенеративного цикла трехступенчатой теплонасосной установки. Холодильный агент бутан –  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ . Температура кипения  $t_0 = +60^\circ\text{C}$ . Температура конденсации  $t_k = +130^\circ\text{C}$ . Обозначение точек цикла соответствует графику (Рис. 1).

Пользуясь диаграммой и таблицами насыщенных паров хладона – бутана [10], определяем параметры, необходимые для расчета.

Энтальпия сухого насыщенного пара, выходящего из испарителя  $i'_1 = 410$  кДж/кг (90°C).

Энтальпия засасываемого компрессором перегретого пара  $i_1 = 260$  кДж/кг (40°C).

Энтальпия жидкого холодильного агента, выходящего из конденсатора  $i_2 = 440$  кДж/кг (130°C).

Энтальпия жидкого холодильного агента, выходящего из конденсатора  $i_3 = 300$  кДж/кг (50°C).

Энтальпия переохлажденного жидкого холодильного агента

$$i'_3 = i_3 - (i_1 - i'_1) = 300 - (260 - 410) = 450 \text{ кДж/кг}$$

Энтальпия переохлажденного жидкого холодильного агента  $i'_3 = i'_4 = 450$  кДж/кг.

Удельная массовая холодопроизводительность  $q_0 = i_1 - i'_4 = 260 - 450 = -190$  кДж/кг.

Теоретическая работа сжатия.

$$l_0 = i_2 - i_1 = 440 - 260 = 180 \text{ кДж/кг.}$$

Теплота, отведенная от холодильного агента в конденсаторе  $q_k = i_2 - i_3 = 440 - 300 = 140$  кДж/кг.

Теплота, отведенная в процессе переохлаждения  $q_{п} = i_3 - i'_3 = 300 - 450 = -150$  кДж/кг.

Холодильный коэффициент цикла

$$\epsilon = \frac{q_0}{l_0} = -1.05 \quad \epsilon = q_0/l_0 = -190/180 = -1.06.$$

Расчет регенеративного цикла трехступенчатой теплонасосной установки. Холодильный агент – природный газ  $CH_4$ . Температура кипения  $t_0 = +60^\circ C$ . Температура конденсации  $t_k = +130^\circ C$ . Обозначение точек цикла соответствует рисунку 1. Пользуясь диаграммой и таблицами насыщенных паров хладона – метана [9], определяем параметры, необходимые для расчета.

Энтальпия сухого насыщенного пара, выходящего из испарителя  $i'_1 = 1782,9$  кДж/кг (90°C).

Энтальпия засасываемого компрессором перегретого пара  $i_1 = 1665,9$  кДж/кг (40°C).

Энтальпия перегретого пара в конце сжатия  $i_2 = 1869,6$  кДж/кг (130°C).

Энтальпия жидкого холодильного агента, выходящего из конденсатора  $i_3 = 1688,4$  кДж/кг (50°C).

Энтальпия переохлажденного жидкого холодильного агента  $i'_3 = i_3 - (i_1 - i'_1) = 1688,4 - (1665,9 - 1782,9) = 1805,4$  кДж/кг

Энтальпия переохлажденного жидкого холодильного агента  $i'_3 = i'_4 = 1805,4$  кДж/кг.

Удельная массовая холодопроизводительность  $q_0 = i_1 - i'_4 = 1665,9 - 1805,4 = -139,5$  кДж/кг

Теоретическая работа сжатия

$$l_0 = i_2 - i_1 = 1869,6 - 1665,9 = 203,7 \text{ кДж/кг.}$$

Теплота, отведенная от холодильного агента в конденсаторе

$$q_k = i_2 - i_3 = 1869,6 - 1688,4 = 181,2 \text{ кДж/кг.}$$

Теплота, отведенная в процессе переохлаждения  $q_{п} = i_3 - i'_3 = 1688,4 - 1805,4 = -117$  кДж/кг

Холодильный коэффициент цикла

$$\epsilon = \frac{q_0}{l_0} = 0.7 \quad \epsilon = q_0/l_0 = -139/203,6 = -0,68.$$

Результаты тепловых расчетов для разных хладагентов приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Результаты тепловых расчетов для вариантов хладагентов

Хладагенты	$q_0$	$l_0$	$q_k$	$q_{п}$	$\epsilon$
$CH_4$	-139,5	203,5	181,2	-117	-0.68
$C_4H_{10}$	-190	180	140	-150	-1.05
He	94,8	218,11	411,58	312,91	0.43
Ф113	16	47	60	3	0.34

Наиболее эффективный хладагент должен быть с низкой холодопроизводительностью и малым холодильным коэффициентом, поскольку они позволяют наглядно продемонстрировать максимальную работу ТПНУ на конденсаторе.

Анализируя данные Таблицы 1 можно сделать вывод, что наиболее эффективные газы это бутан  $C_4H_{10}$ , и метан  $CH_4$ .

Для уточнения выбора требуются дополнительные сведения, характеризующие эксплуатационные свойства газов, приведенные в Табл. 2.

Таблица 2

Достоинства и недостатки хладагентов

Хладагент	Недостатки	Достоинства
Метан	Опасность утечки газа, малое количество заправок, пожароопасность	Газ дешевле топлива, экологичность, долгая служба двигателя, стабилен при высоких температурах
Бутан	Опасность утечки газа, невозможность использования при низких температурах, малое количество заправок, пожароопасность	Газ дешевле топлива, экологичность, долгая служба двигателя.
Гелий	Сложное получение и добыча, дороже по сравнению с метаном и бутаном	Пожаробезопасен, не токсичен, низкие температуры кипения
Хладон	Озоноразрушающий, нестабильный при высоких температурах, запрещен после 2030г.	Дешевый в сравнении с топливом, кипит при положительных температурах

### Заключение

На основании приведенных расчетов можно сделать вывод, что наиболее эффективными хладагентами для ТПНУ являются бутан  $C_4H_{10}$ , и метан  $CH_4$ . Для работы при высоких температурах предпочтительнее более стабильный хладагент – это метан  $CH_4$  [13].

Особенно хотелось бы выделить метан, его низкая стоимость и высокая теплоемкость, позволила бы его использовать в ТПНУ в качестве хладагента на судах типа газозвоны или на судах с газотопливной системой. Гелий же в свою очередь благодаря низкой температуре кипения мог бы

использоваться в ТПНУ, в качестве хладагента, на судах типа танкер и атомход.

Для работы ТПНУ на судах типа – газозвоны возможно применение природного газа, так как более 93% состава природного газа – это метан, и термодинамические характеристики природного газа определяются в основном характеристиками метана.

Использование природного газа в качестве хладагента стало возможным с появлением нового качественного оборудования и подготовленных квалифицированных специалистов по эксплуатации установки на природном газе.

### Литература

1. Берзан В.П., Робу С.Г., Шит М.Л. Аспекты проблемы стимулирования внедрения тепловых насосов. Проблемы регион. энергетики. 2011. № 1. С. 91–94.
2. Соболенко А.Н., Симашов Р.Р. Судовые энергетические установки: дипломное проектирование: учеб. пособие. М.: Моркнига, 2015. Ч. II. 425 с.
3. Волинцев А.В. Опытная теплонасосная установка. Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. 2015. Т. 36. С. 80-85.
4. Волинцев А.В. Теплонасосная установка для использования на судах промыслового флота. Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 4. С. 121-125.
5. Волинцев А.В., Соболенко А.Н. Утилизация тепловых ресурсов главного судового двигателя посредством использования теплонасосной установки. Вестник ГУМРФ им. адм. С.О. Макаров. Выпуск 5 (39). 2016 г. С. 144-150.
6. Волинцев А.В. Обоснование эффективности использования теплового насоса на судне. Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. 2016. Т.38. С. 41-47.
7. Рей Д., Макмайкл Д. Тепловые насосы: Пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1982. 224 с., ил.
8. Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.un.org/ru/documents/decl\\_conv/conventions/montreal\\_prot.shtml](http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/montreal_prot.shtml) (дата обращения – 10.09.16)
9. Кондрашова Н.Г. Холодильное и технологическое оборудование промысловых судов. 2–е изд., переработанное и дополненное. М.: Пищевая промышленность. 1979. 288 с.
10. Васков Е.Т., Термодинамические основы тепловых насосов: учеб. пособ. для студ. спец 270109, 270105, 190601/ СПб. гос. архит.-строит. ун-т. СПб., 2007. 127 с.
11. Термодинамические диаграммы  $i$ - $lgP$  для хладагентов. М.: АВИСАНКО, 2003. –50 с.
12. Термодинамические свойства газов: Справочник. 4-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1987. 288 с.
13. Загорученко В.А., Журавлёв А.М. Теплофизические свойства газообразного и жидкого метана. М.: Изд-во стандартов. 1969. 237 с.

### References

1. Berzan V.P., Robu S.G., Shit M.L. Aspekty problemy stimulirovaniya vnedreniya teplovykh nasosov. Problemy region. energetiki. 2011. № 1. S. 91–94.
2. Sobolenko A.N., Simashov R.R. Sudovyye energeticheskiye ustanovki: diplomnoye proyektirovaniye: ucheb. posobiye. M.: Morkniga. 2015. Ch. II. 425 s.
3. Volyntsev A.V. Opytnaya teplonasosnaya ustanovka. Nauchnyye trudy Dalnevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo rybokhozyaystvennogo universiteta. 2015. T. 36. S. 80-85.
4. Volyntsev A.V. Teplonasosnaya ustanovka dlya ispolzovaniya na sudakh promyslovogo flota. Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka. 2015. № 4. S. 121-125.
5. Volyntsev A.V., Sobolenko A.N. Utilizatsiya teplovykh resursov glavnogo sudovogo dvigatelya posredstvom ispolzovaniya teplonasosnoy ustanovki. Vestnik GUMRF im. adm. S.O. Makarov. Vypusk 5 (39). 2016 g. S. 144-150.
6. Volyntsev A.V. Obosnovaniye effektivnosti ispolzovaniya teplovogo nasosa na sudne // Nauchnyye trudy Dalnevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo rybokhozyaystvennogo universiteta. 2016. T.38. S. 41-47.
7. Rey D., Makmaykl D. Teplovyye nasosy: Per. s angl. M.: Energoizdat. 1982. – 224 s.. il.
8. Monrealskiy protokol po veshchestvam. razrushayushchim ozonovyy sloy [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: [http://www.un.org/ru/documents/decl\\_conv/conventions/montreal\\_prot.shtml](http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/montreal_prot.shtml) (data obrashcheniya 10.09.16).
9. Kondrashova N.G. Kholodilnoye i tekhnologicheskoye oborudovaniye promyslovykh sudov. 2–e izd., pererabotannoye i dopolnennoye M.: Pishchevaya promyshlennost. 1979. 288 s.
10. Vaskov E.T., Termodinamicheskiye osnovy teplovykh nasosov: ucheb. posob. dlya stud. spets 270109, 270105, 190601. SPb. gos. arkhit.-stroit. un-t. SPb., 2007. 127 s.
11. Termodinamicheskiye diagrammy  $i$ - $lgP$  dlya khladagentov. M.: AVISANKO. 2003. 50 s.
12. Termodinamicheskiye svoystva gazov: Spravochnik. 4-e izd., pererab. M.: Energoatomizdat. 1987. 288 s.
13. Zagoruchenko V.A., Zhuravlyov A.M. Teplofizicheskiye svoystva gazoobraznogo i zhidkogo metana. M.: Izd-vo standartov. 1969. 237 s.

УДК 629.12.002 + 620.9

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЛУБИНЫ УДАЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ ИЗ ОТРАБОТАННЫХ РЕГЕНЕРИРОВАННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ НА ИЗНАШИВАНИЕ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

**Валерий Васильевич Тарасов**

профессор кафедры Судовые двигатели внутреннего сгорания  
Морской государственной университет им. адм. Г.И Невельского  
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а  
тел.: 8 (902) 064-11-64; e-mail: vtarasov@msun.ru

**Анатолий Иванович Самсонов**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Судовой энергетики и автоматики  
Дальневосточный федеральный университет  
690091, Владивосток, ул. Суханова. 8  
e-mail: aicam@mail.ru

### Аннотация

Рассматривается использование математических методов планирования эксперимента для получения математической модели многомерного процесса удаления нерастворимых при регенерации механических примесей использованных масел, применяемых в судовых дизелях, при учете его большой вариабельности и неполных сведений о протекаемом процессе. Регенерация отработанных смазочных материалов судовых дизелей является важной задачей сбережения горюче-смазочных материалов в процессе их эксплуатации. В судовых условиях необходимо применение малогабаритных модульных регенерационных комплексов «Румс», которые могут решить поставленную задачу по повторному использованию ресурса моторных масел и снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду. Экспериментальные исследования проводились для групп отработанных моторных масел разного уровня эксплуатационных свойств, которые были применены в высокооборотных и форсированных дизелях. Масла в исходном состоянии полностью соответствовали продуктам по ГОСТ 12337-84: М-14-Д<sub>2</sub>(цл30), М-14-Д<sub>2</sub>(цл20), М-14-Г<sub>2</sub>(цс).

**Ключевые слова:** уравнение регрессии, планирование эксперимента, коэффициент регенерации, моторные масла, механические примеси, экспериментально статистическая модель

## EXPERIMENTAL MODELING OF INFLUENCE THE DEPTH OF REMOVING MECHANICAL IMPURITIES FROM THE USED REGENERATED MOTOR OILS ON SHIP DIESEL WEAR

**Valery V. Tarasov**

Professor of department of Ship power installations  
Maritime state university named Admiral Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: 8 (902) 064-11-64; e-mail: vtarasov@msun.ru

**Anatoly I. Samsonov**

Professor, Dr. Sci. Tech.,  
Professor of Ship energetic and automatics department,  
Far Eastern Federal University  
8, Sukhanova st., 690091, Vladivostok, Russia  
e-mail: aicam@mail.ru

### Abstract

The article deals with the application of mathematical methods for optimal planning of the experiment with a view to obtaining a mathematical model of the multidimensional process of removing insoluble mechanical impurities in the regeneration of engine oils used in marine diesel engines, given its multifactority and incomplete information on the mechanism of this process. The regeneration of used engine oil of marine diesel engines is an important task of energy and resource saving of combustible materials in the process of their operation. In ship's conditions it is necessary to use small-size modular regeneration complexes "Rums", which can solve the set task of reusing the resource of motor oils and reducing the anthropogenic load on the environment. Experimental studies were carried out for groups of used engine oils of different levels of performance properties that operated in marine diesel engines with an increased frequency of rotation and boosting at an average effective pressure. The oils in the initial state fully corresponded to the products of М-14-Г<sub>2</sub>(цс), М-14-Д<sub>2</sub>(цл20) and М-14-Д<sub>2</sub>(цл30) (GOST 12337-84).

**Key words:** experiment planning, regression equation, experimental statistical model, regeneration factor, used engine oil, mechanical impurities

**Введение**

Регенерация отработанных моторных масел [ОММ] судовых дизелей является актуальной задачей энергоресурсосбережения горюче-смазочных материалов в процессе их эксплуатации наряду с другими способами [1,2]. На кафедре СДВС МГУ имени адмирала Г.И. Невельского создана установка по регенерации ОММ «Румс-1», которая является частью авторской схемы регенерационного комплекса «Румс» с использованием штатного оборудования систем СЭУ [3,4].

Целью данной работы является разработка модели влияния глубины очистки от механических нерастворимых примесей (НРП) отработанных масел разных моторных групп на суммарный износ и скорость изнашивания трибосопряжений узла ДВС на основании данных эксперимента, выполненных на машине трения СМЦ-2.

**1. Объекты испытаний и планирование экспериментальных исследований**

В качестве критерия оптимизации процесса глубины очистки отработанных моторных масел (ОММ) от НРП выбрана оценка износа *I* основных деталей судового дизеля [4, 5]. Зависимость износа тогда выразим связью:

$$I = f(\varphi_p M), \tag{1}$$

где  $\varphi_p$  - коэффициент регенерации, относительная величина %; *M* - ранг масла (группа моторных масел по эксплуатационным свойствам).

Для проведения эксперимента были подобраны три группы моторных масел (ММ), и полностью, в исходном состоянии, соответствовали продуктам по ГОСТ 12337-84: М-14-Д<sub>2</sub>(цл30); М-14-Д<sub>2</sub>(цл20); М-14-Г<sub>2</sub>(цс) [5].

Управляемые факторы - это выраженные через ранг - *M* масла разных моторных групп с разным уровнем загрязнения НРП в зависимости от условий эксплуатации дизелей и эксплуатационных свойств моторных масел по группам форсирования ДВС. Оценкой уровня загрязнения ОММ является коэффициент регенерации  $\varphi_p$ , 0, 0,5 и 1, соответствующий пробам с загрязнением НРП

$$c_{(-1)} = 4 \pm 0,4 \% \quad (x_1 = -1), \quad c_{(0)} = 2 \pm 0,2 \% \quad (x_1 = 0), \\ c_{(+1)} = 0,2 \pm 0,05 \% \quad (x_1 = +1) \tag{5}$$

Расчет коэффициента регенерации представлен как соотношение содержания НРП  $c_x$  в очищенном масле и его исходной концентрации  $c_{(-1)}$ ,  $\varphi_p = (c_{(-1)} - c_{(i)}) / c_{(-1)}$ . Кодирование факторов показано в таблице.

Таблица 1

**Уровни и интервалы варьирования факторов**

Факторы	Кодовые обозначения	Интервал варьирования	Уровни факторов		
			нижний -1	основной 0	Верхний +1
Коэффициент регенерации ММ по нерастворимым примесям $\varphi_p$ , отн. ед.	$x_1$	0,5	0	0,5	1
Качество отработанного масла <i>M</i> , ранг	$x_2$	1	-1	0	+1

Износ подвижного и неподвижного роликов за цикл испытаний, (5 часов) является функцией отклика *y* в относительных единицах (%) результата в центре факторного пространства ( $x_1 = x_2 = 0$ ). Весомость износа роликов при формировании суммарного показателя *I* принята одинаковой [4,5].

Суммарный износ рассчитывали по формуле

$$N_j = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta G_{сч(j)}}{\Delta \bar{G}_{сч(0)}} + \frac{\Delta V_{cr(j)}}{\Delta \bar{V}_{cr(0)}} \right) 100\% .$$

При  $x_1 = x_2 = 0$  износ подвижного ролика был равен  $\Delta \bar{G}_{сч(0)} = 36$  мг, неподвижного –  $\Delta \bar{V}_{cr(0)} = 142 \cdot 10^{-3}$  мм<sup>3</sup>. Ортогональный центральный композиционный план второго порядка выбран для проведения экспериментов, что позволяет определять все коэффициенты регрессии независимо друг от друга. Достоинство его состоит в малом объеме вычислений. Ортогонализация экспериментальных данных основана на выборе «звездного» плана с преобразованием квадратичных членов уравнения по рекомендациям [6,7].

Реализация эксперимента позволила функцию отклика *y* (износ *I*) получить как полином второй степени:

$$y = 101,5 - 24,1x_1 - 19,7x_2 + 11,12x_1x_2 + 15,28x_1^2 + 5,13x_2^2. \tag{2}$$

Коэффициенты уравнения (2) характеризуют влияние абразивности НРП на показатели суммарного износа *I* и скорости изнашивания *J* обоих роликов по мере увеличения  $\varphi_p$ .

Наибольшее влияние оказывает первый фактор  $x_1$  ( $b_1 = -24,15$ ). С ростом показателя  $x_1$  эффект от углубления очистки ОММ снижается. На этот факт указывает довольно высокое значение коэффициента  $b_{11} = 15,28$ .

Эффект взаимодействия факторов  $x_1$  и  $x_2$  выражен существенно ( $b_{12} = 11,12$ ), так как уменьшается роль качества (моторной группы) ОММ (при переходе от  $M = -1$  к  $M = +1$ ) по мере роста коэффициента регенерации.



Влияние запаса качества масла, фиксируемого группой моторных свойств (фактор  $x_2$ ), проявляется менее ярко ( $b_2 = -19,7$ ), так как его численное значение  $b_2$  меньше  $b_1$ .

При переходе с масла одной моторной группы к другой уменьшение износа замедляется - это определяет величина и положительное значение коэффициента  $b_{12}$ .

Квадратичный эффект ( $b_{22} = 5,15$ ) от действия фактора  $x_2$  проявляется в меньше, но он значим.

Анализ показывает что, уравнение регрессии в кодированных переменных адекватно [7,8].

**2. Результаты и обсуждение**

Следовательно, модель представленная как уравнение (2) в кодированных переменных ( $x_1$  и  $x_2$ ) на базе обозначенного выбора планирования

эксперимента, с заменой на интерпретацию управляющих факторов в натуральных значениях  $\varphi_p$  и  $M$ , примет вид:

$$I = 101,5 - 24,15\varphi_p - 19,7M + 11,12\varphi_p M + 15,28\varphi_p^2 + 5,13M^2 \quad (3)$$

Уравнение (3) неудобно для интерпретации полученных результатов исследования, поэтому, используя ресурсы программного комплекса MathCad 15, для наглядной оценки процесса изнашивания деталей дизеля получили графическое изображение гиперплоскости в 3-х мерном пространстве для кодированных значений управляемых факторов (Рис. 1 и 2).

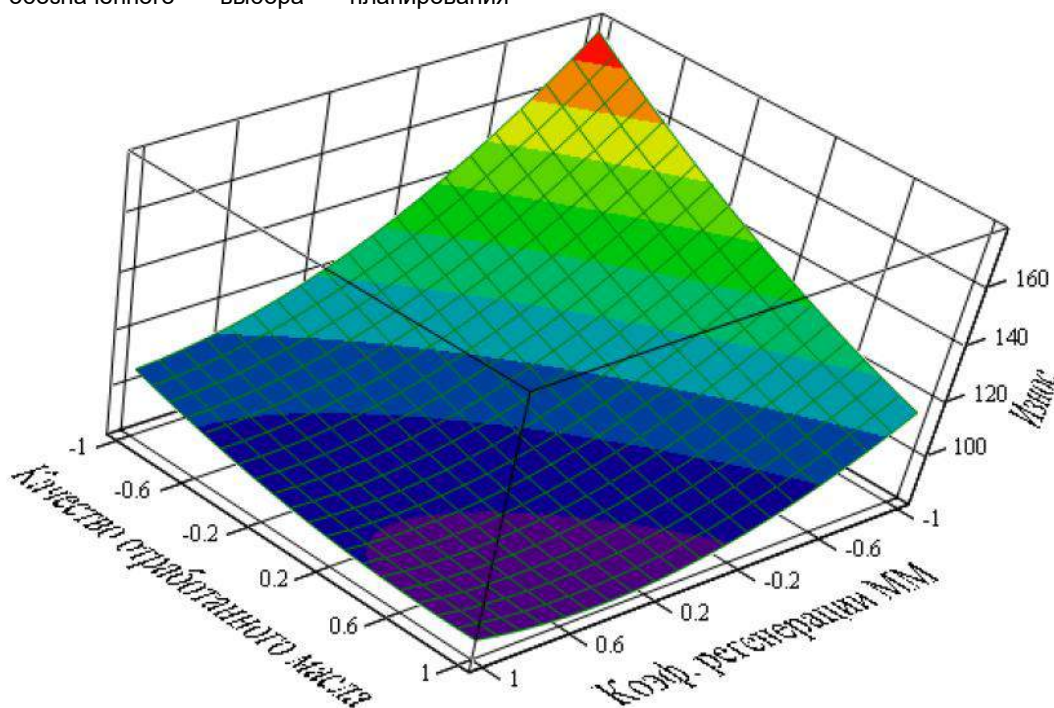


Рис. 1. Гиперплоскость в 3-х мерном пространстве в кодированных значениях факторов, оценивающая противоположных свойств РММ через изнашивание судового дизеля

Графическая иллюстрация поверхности отклика, полученная при оценке износных свойств РММ, по полученной нелинейной многофакторной экспериментальной регрессионной модели изменения величины изнашивания от ранга масел (свойства моторной группы масел) и коэффициента регенерации (глубины очистки от НРП).

Полученные графические зависимости рекомендуется пользоваться для определения

параметров глубины очистки от НРП отработанных моторных масел разных моторных групп при их регенерации с доверительной вероятностью 0,95, с целью формирования методики регенерации ОММ в судовых условиях по авторской схеме с использованием штатного сепарационного оборудования [5, 6, 7 и 11].

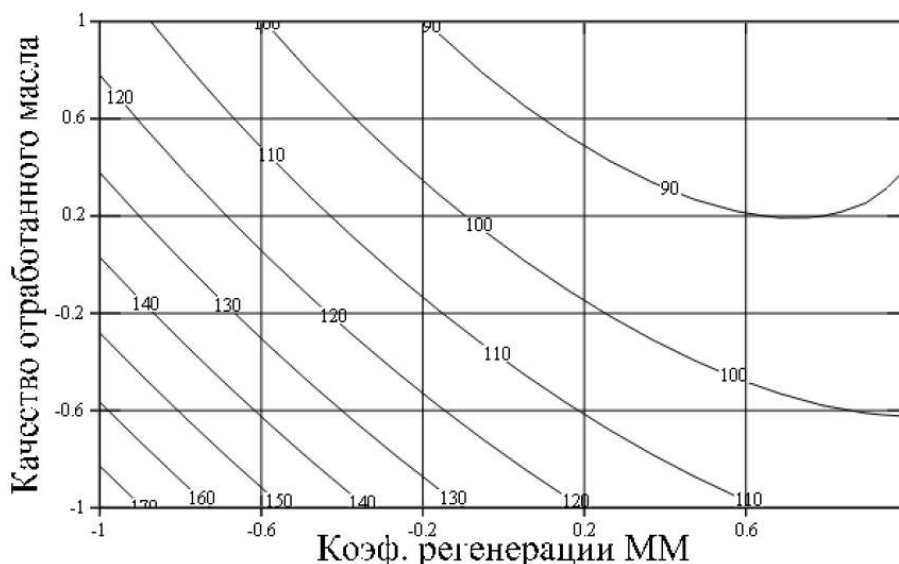


Рис 2. Двухмерное сечение, характеризующее изнашивание деталей дизеля от коэффициента регенерации и качества свойств моторной группы масел

**Заключение**

1. Очистка ОММ при их регенерации до полного удаления НРП, различными способами не улучшает существенно противоизносные и моюще-диспергирующие показатели восстановленных на их основе нефтепродуктов. Так как это приводит к полному удалению мелкодисперсной фазы НРП и способствует отфуговыванию большинства присадок типа МАСК, ППС и некоторых модификаторов трения, а это ухудшает эксплуатационные свойства регенерированных, восстановленных ММ.

2. Оценка противоизносных свойств ОММ на машине трения после их «мягкой» регенерации с частичным удалением НРП доказала ее рациональность. Эксплуатационные параметры регенерированных ММ при легировании их присадками будут на уровне свойств свежего масла соответствующей моторной группы.

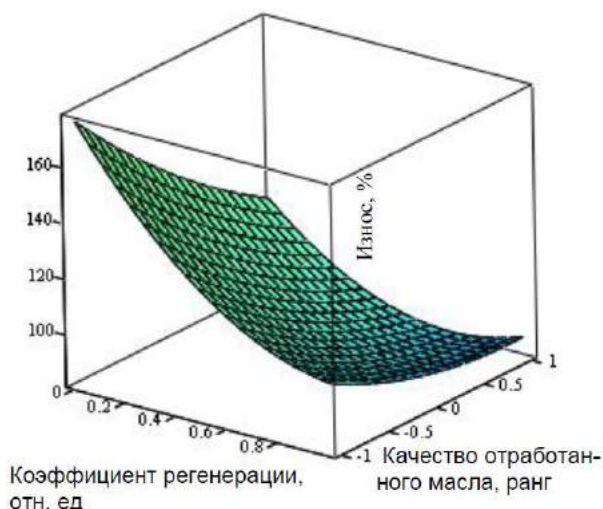


Рис. 3. Гиперплоскость в 3-х мерном пространстве в натуральных величинах управляемых факторов, оценивающая зависимость противоизносных свойств РММ через изнашивание судового дизеля, с учётом качества свойств моторной группы масел и коэффициента их регенерации

**Литература**

1. Тарасов, В.В. Принципиальная схема установки по регенерации отработанного моторного масла в судовых условиях / В.В. Тарасов, П.В. Кулямов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 2. – С. 175–179.
2. Соболенко А. Н., Симашов Р. Р., Глазюк Д. К., Маницын В. В. Определение расхода топлива и моторного масла судовыми дизелями с учетом изменения внешних условий эксплуатации // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2017. №3. С. 62–73.
3. Тарасов, В.В. Проблемы утилизации и регенерации отработанных смазочных материалов на судах: пути их решения восстановлением моторных свойств и повторным использованием в судовых дизелях / В. В. Тарасов // Сб. науч. тр. конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2010». – Одесса: Транспорт, 2010. – Т. 1. – С. 65–71.
4. Кича, Г.П. Эффективность применения в судовых дизелях регенерированных восстановленных отработанных моторных масел / Г.П. Кича, В.В. Тарасов, Е.М. Деревцов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2016. – № 1,2. – С. 83–91.

5. Тарасов В.В. Обоснование глубины очистки отработанных моторных масел от механических примесей при их регенерации и повторном использовании в СЭУ / Тарасов В.В. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2016. – № 3,4. – С. 99–108.
6. Кича Г.П. Регенерирование отработанных моторных масел и восстановление их эксплуатационных свойств на судах / Г.П. Кича, В.В. Тарасов, С.В. Глушков // Морские интеллектуальные технологии. – 2016. – № 3 (33), Т. 1. – С. 126–132.
7. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
8. Кича, Г.П. Имитационное моделирование смазки трибосопряжений и изнашивания основных деталей ДВС / Г.П. Кича, А.В. Надежкин, Б.Н. Перминов // Транспортное дело России. – 2004. – № 2. – С. 51–53.
9. Кича, Г.П. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях / Г.П. Кича, Б.Н. Перминов, А.В. Надежкин // – Владивосток: Мор. гос. ун-т, – 2011. – 372 с.
10. Кича, Г.П. Триботехнические характеристики нерастворимых продуктов загрязнения моторных масел и их влияние на износ дизеля / Г.П. Кича, Г.М. Липин, С.П. Полоротов // Трение и износ. – 1998. – Т. 7, № 6. – С. 1068–1078.
11. Kicha, G.P. Wear simulation of vessel trunk piston diesels using unifec motor oils / G.P. Kicha, B.N. Perminov, A.V. Nadezkin // Trenie i iznos. – 2004, – Vol. 25, – № 6. – P. 635–641.

#### References

1. Tarasov, V. V. Schematic diagram of the installation for the regeneration of spent engine oil in ship conditions / V.V. Tarasov, P. V. Kulyamov // Scientific problems of transport of Siberia and the Far East. – 2015. – No. 2. - P. 175-179.
2. Sobolenko A.N., Simashov R.R., Glazyuk D.K., Manitsyn V.V. Determination of fuel and engine oil consumption by ship diesel engines taking into account changes in external operating conditions // Vestnik ASTU. Ser. : Marine technic and technology. 2017. №3. P. 62-73.
3. Tarasov, V. V. Problems of recycling and regeneration of used lube oil on ships: their solutions restoration of motor properties and re-use in marine diesel engines / V.V. Tarasov // Proc. scientific. Tr. Conf. "Modern directions of theoretical and applied research 2010". - Odessa: Transport, 2010. - Vol. 1. - P. 65-71.
4. Kicha, G. P. Effectiveness of application in marine diesel engines the reg-narisovannyi recovered used motor oil / G. P. Kicha, V. V. Tarasov, E. M. Derevtsov // Scientific transport problems of Siberia and the Far East. – 2016. - №1,2. - P. 83-91.
5. Tarasov V. V. Justification of the purification of used motor oils from mechanical impurities during their regeneration and re-use in SEU / V. V. Tarasov // Scientific transport problems of Siberia and the Far East. – 2016. - №3,4. - P. 99-108.
6. Kicha G. P. Regeneration of used motor oils and restoration of their operational properties on ships /G. P. Kicha, V. V. Tarasov, S. V. Glushkov // Marine intellectual technologies. – 2016. – No. 3 (33), vol.1. - P. 126-132.
7. Spiridonov, A. A. Design of experiments in the study of technological processes / A. A. Spiridonov. - M.: Engineering, 1981. - 184 p.
8. Kicha, G. P. Simulation of the lubrication of triborate stresses and wear of the main parts of internal combustion engines / G. P. Keech, A. V. Nadezhkin, B. N. Perminov // Transport case of Russia. – 2004. – No. 2. - P. 51-53.
9. Kicha, G. P. Sustainable oil used in marine diesel engines / G. P. Kicha, B.N. Perminov, A. V. Nadezhkin // Vladivostok: Mor. state un-ta, 2011. - 372 p.
10. Kicha, G. P. Tribological properties of insoluble products contamination of engine oils and their effect on wear of diesel / G. P. Kicha, G. M. Lipin, S. P. Polorotov // Friction and wear. – 1998. – Vol. 7, No. 6. - P. 1068-1078.
11. Kicha, G.P. Wear simulation of vessel trunk piston diesels using unifec motor oils / G.P. Kicha, B.N. Perminov, A.V. Nadezkin // Trenie i iznos. – 2004, – Vol. 25, – № 6. – P. 635–641.

УДК 621. 436. 001.63

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОДОТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ

**Геннадий Бенцианович Горелик**

профессор, доктор технических наук  
профессор кафедры Двигателей внутреннего сгорания  
Тихоокеанского государственного университета  
680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136  
тел.: +7-914-156-92-06; e-mail: ggorelik@mail.ru

**Алексей Юрьевич Коньков**

доцент, доктор технических наук  
профессор кафедры двигателей внутреннего сгорания  
Тихоокеанского государственного университета  
680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136  
тел.: +7-914-547-00-85; e-mail: 007380@pnu.edu.ru

### Аннотация

Водотопливная эмульсия может рассматриваться как один из вариантов альтернативного топлива. Хорошо известно, что ее применение для судовых дизелей положительно сказывается на качестве смесеобразования и горения топлива. Как следствие этого, улучшаются экономические и экологические показатели дизеля. При этом проблемными вопросами остаются стабильность и энергозатраты на приготовление топлива. В настоящей работе, на основе теоретических и экспериментальных исследований установлена связь между показателями качества водотопливной эмульсии и энергии, затраченной на ее приготовление. Предложен показатель качества эмульсии – относительный коэффициент качества, характеризующий размеры капель воды в эмульсии относительно «идеальной» эмульсии. На примере полученных ранее патентов рассмотрены некоторые практические аспекты приготовления водотопливной эмульсии и ее использования для судовых дизелей как один из вариантов альтернативного топлива

**Ключевые слова:** водотопливная эмульсия, водосодержание, альтернативное топливо

## ESTIMATION OF THE QUALITY OF THE WATER-FUEL EMULSION

**Gennadiy B. Gorelik**

professor, Dr.Sci.Tech.,  
Professor of department of Internal combustion engines  
Pacific National University  
136, Tikhookeanskaya St., Khabarovsk, 680035, Russia  
tel.: +7-914-156-92-06; e-mail: ggorelik@mail.ru

**Aleksei Yu. Konkov**

associate professor, Dr.Sci.Tech.,  
Professor of department of Internal combustion engines  
Pacific National University  
136, Tikhookeanskaya St., Khabarovsk, 680035, Russia  
tel.: +7-914-547-00-85; e-mail: 007380@pnu.edu.ru

### Abstract

A fuel oil emulsion can be considered as one of the alternative fuel options. It is well known that its use for marine diesels positively affects the quality of the mixture formation and combustion of fuel. As a consequence, the economic and environmental performance of the diesel is improving. At the same time, stability and energy consumption for fuel preparation remain problematic issues. In this study, on the basis of theoretical and experimental investigations, a relationship has been established between the quality of the water-fuel emulsion and the energy spent on its preparation. The emulsion quality index is proposed: the relative quality factor characterizing the dimensions of water droplets in the emulsion relative to the "perfect" emulsion. On the example of patents obtained earlier, some practical aspects of the preparation of a water-fuel emulsion and its use for marine diesel engines as one of variants of alternative fuel are considered.

**Key words:** water-fuel emulsion, water content, alternative fuel

### Введение

Показатели качества топлива и моторного масла судового дизеля оказывают ключевое влияние не только на экологические и экономические характеристики дизеля, но, также, на его надежность и долговечность [1-3].

Вопросы использования водотопливной эмульсии в качестве альтернативного топлива для судовых

дизелей рассмотрены авторами в статье [4]. Возникает необходимость в оценке свойств эмульсии, которые определяют возможности ее эффективного и безопасного применения в судовой энергетической установке.

Главным показателем качества эмульсии является ее стабильность во времени и размер капель дисперсной фазы, что определяет

возможность прохождения их через микронные зазоры в прецизионных элементах топливной аппаратуры и склонность к коагуляции водной фазы. Безусловно, таким определяющим фактором является мелкость диспергирования воды ВТЭ, характеризующаяся радиусом капель или модой среднего (обобщенного) диаметра капель. При создании водотопливной эмульсии (ВТЭ), независимо от способа приготовления, к смеси воды и топлива подводится извне энергия, которая изначально «заряжает» именно крупные глобулы воды [5]. При этом силы поверхностного натяжения не могут удержать в цельном состоянии эти глобулы, и они разделяются на капли меньшего диаметра. По мере дальнейшего подвода энергии мода капель продолжает уменьшаться, а вокруг капель воды на поверхности образуется тончайшая сольватная оболочка, представляющая собой своего рода «вытяжку» смолистых составляющих топлива. Такую каплю в ВТЭ можно рассматривать как некий аналог электрического конденсатора с положительным зарядом на поверхности. По мере уменьшения моды и роста количества капель появляются силы электростатического отталкивания и происходит равномерное рассредоточение водной фазы в топливе, что и предопределяет невозможность слияния капель во времени. Среди эксплуатационных свойств ВТЭ, главным является стабильность во времени. Появляется новое свойство эмульсии - накопление подводимой энергии при приготовлении независимо от способа (эмульсия представляет собой как бы аккумулятор). При вводе ВТЭ в камеру сгорания дизеля эта энергия идет на совершение эффективной работы. Эффект теплового взрыва согласно теории О.Н. Лебедева усиливается обратно пропорционально моде микро капель воды в ВТЭ. Кроме того, для качественно приготовленной эмульсии снижаются потери в тракте топливной системы (ВТЭ ведет себя как «шарикоподшипник»), что способствует некоторому возрастанию давления впрыскивания. Процессы топливоподачи протекают при повышенных значениях активного хода плунжера, пропорционально водосодержанию эмульсии, что также способствует улучшению работы топливной аппаратуры (повышение давления впрыскивания) и рабочего процесса дизеля, ведет к повышению эффективности использования топлива. Известно, что по мере снижения моды капель воды и превращения двухфазной системы в некое новое стабильное агрегатное состояние изменяются и кислотно-щелочные свойства эмульсии. Так при проведении химического анализа подобных эмульсий нами установлены практически нулевые значения кислотных и щелочных свойств, что объясняется переходом кислот и щелочей в состав сольватной оболочки и их консервации. Это исключает возможность химической коррозии деталей топливной аппаратуры.

### 1. Концепция оценки качества ВТЭ

Цель настоящего исследования заключалась в установлении показателя качества ВТЭ, однозначно связывающий вводимую в диспергатор энергию с вышеописанными свойствами ВТЭ, как альтернативного топлива. Этот показатель качества должен определять агрегативную и кинематическую

устойчивость приготовленной ВТЭ и определять стабильность эмульсии. Работа выполнялась в лаборатории кафедры "ДВС" ТОГУ на основе полученных ранее патентов [6].

Одной из задач, требующих решения для достижения поставленной цели, было выявление связей между размерами капель и энергией, подведенной в диспергатор на основе существующей теории. Так, энергия, определяющая распад глобул воды в эмульсии, в связи с изменением силы поверхностного натяжения, может быть определена по известной формуле  $W_B = \sigma_n S$ , где  $\sigma_n$  - поверхностное натяжение воды;  $S$  - суммарная площадь поверхности капель воды,  $S = i_k \cdot 4\pi R^2$ .

Тогда для ВТЭ с объемным водосодержанием  $c_v$  количество капель воды может быть определено как

$$i_k = \frac{3c_v}{4\pi(1-c_v)R^3} \cdot V_T, \text{ где } V_T - \text{объем топлива в}$$

диспергаторе стэнда для приготовления эмульсии (принят мерный объем, равный 1000 см<sup>3</sup>, вода добавляется исходя из требуемого объемного водосодержания приготовляемой эмульсии

$$V_e = \frac{c_v}{1-c_v} \cdot V_T. \text{ Окончательно имеем}$$

$$w_e = 3\sigma_n \frac{c_v}{1-c_v} \cdot \frac{V_T}{R}.$$

Сам лабораторный стэнд [7, 8] для гидродинамического приготовления ВТЭ с целью исследования ее свойств представляет собой емкость, в которую заливается топливо в количестве 1000 см<sup>3</sup> и объем воды  $V_B$ , определяемый по выше приведенной формуле. Шестеренный насос типа НШ-10 с приводом от электродвигателя забирает из нижней части емкости смесь топлива с водой и через распылитель (диспергатор) под давлением 10 МПа, задаваемым регулятором, производит впрыскивание в емкость. ВТЭ получается после  $n$ -кратного повторения эксперимента с отбором пробы эмульсии, а каждый эксперимент длится циклами с интервалом времени  $\Delta t$  по 300 сек (5 минут). Таким образом, обеспечивается получение эмульсии различного качества, определяемого достижением той или иной моды с последующей фоторегистрацией качества эмульсии на стеклянных пластинках под микроскопом при высоком увеличении. Качественный показатель пробы может быть представлен функцией от времени приготовления. Пробы ВТЭ оценивались на стабильность, химические свойства, а также использовались для проверки процессов топливоподачи на топливных и моторных стэндах.

Энергия, подводимая к диспергатору, определяется как  $w = \frac{mV^2}{2}$ , где  $m$  - масса ВТЭ с

плотностью  $\rho$ , прошедшая через распылитель за время  $\Delta t$ ;  $V$  - скорость истечения через распылитель. После приведения получаем

$$w = \mu f \sqrt{\frac{2}{\rho}} (\Delta p)^3 \Delta t \cdot n.$$

При этом полагается, что

вся подведенная энергия идет на дробление капель и нагрев эмульсии. Глобулы воды уже после первых нескольких проходов через распылитель начинают образовывать на своей поверхности сольватную оболочку, которая действует на величину сил поверхностного натяжения аналогично поверхностно-активным веществам, уменьшая эти силы на порядок (с  $73 \cdot 10^{-5}$  до  $2 \dots 5 \cdot 10^{-5}$  Н/см). Нагрев эмульсии действует в этом же направлении, снижая силы еще на 10...15%. Поэтому целесообразно вводить подогрев емкости. Исходя из равенства подведенной энергии и энергии диспергирования, определим радиус получаемых капель воды после многократного обращения эмульсии по контуру

$$R = \frac{3\sigma_n c_v V_T}{(1 - c_v) \mu f \sqrt{\frac{2}{\rho}} \Delta p^3 \Delta t \cdot n}.$$

Для нормальных условий для дизельного топлива при настройке стенда на давление  $\Delta p = 10$  МПа, за цикл  $\Delta t = 300$  с при  $n = 1$  для распылителя с соплом 0,5 см получаем средний арифметический радиус капль  $R \approx 26$  мкм. При нагреве ВТЭ мелкость водной фракции будет еще меньше. С увеличением числа циклов мода частиц воды будет уменьшаться.

### 2. Оценка качества ВТЭ

На графике (Рис. 1) представлена зависимость моды дисперсной фазы как функция от числа циклов  $n$  (или от времени). Результаты уточняются в процессе выполнения экспериментальных работ на установке.

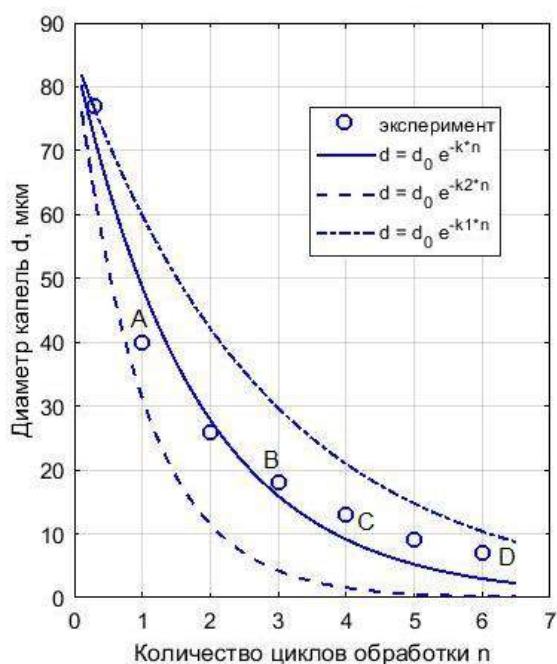


Рис. 1. Зависимость моды водной фазы эмульсии от числа циклов обработки

Как видно из рисунка, характер изменения экспериментальных данных близок к экспоненциальному закону зависимости качества эмульсии от времени ее обработки. Достижение приемлемого размера капль водной фазы возможно при  $n \geq 3 \dots 4$  циклов обработки (т.е. в течении 15–20 минут) при получении значения моды порядка 5-8 мкм.

Сплошной линией представлена зависимость моды капль воды от числа циклов (или от времени) для конкретного способа приготовления ВТЭ,  $d = d_0 e^{-kn}$ . Для других изображенных на рисунке способов справедливо условие  $k_1 < k < k_2$ .

Для точек А, В, С и D, показанных на рисунке, фотографированием проб на микроскопе типа МИМ на предметном стекле определялись виды и размеры полученных мод при различных значениях количества циклов диспергирования на стенде (см. схему Рис. 2).

По мере увеличения числа циклов обработки ВТЭ мода уменьшается, происходит равномерное распределение капль воды в дисперсной среде, наконец, глубокая обработка приводит к появлению сольватной оболочки на каплях воды, при этом мода достигает 8 мкм. Такая ВТЭ приемлема для использования в качестве альтернативного топлива, так как ее стабильность во времени достаточна для прохождения по всему тракту топливной аппаратуры без оказания вредного влияния на ее элементы.

Качество ВТЭ можно оценить коэффициентом качества, который при равных условиях пропорционален поверхности капль воды в эмульсии и обратно пропорционален их объему

$$A = \frac{S}{V} = \frac{15}{d}.$$

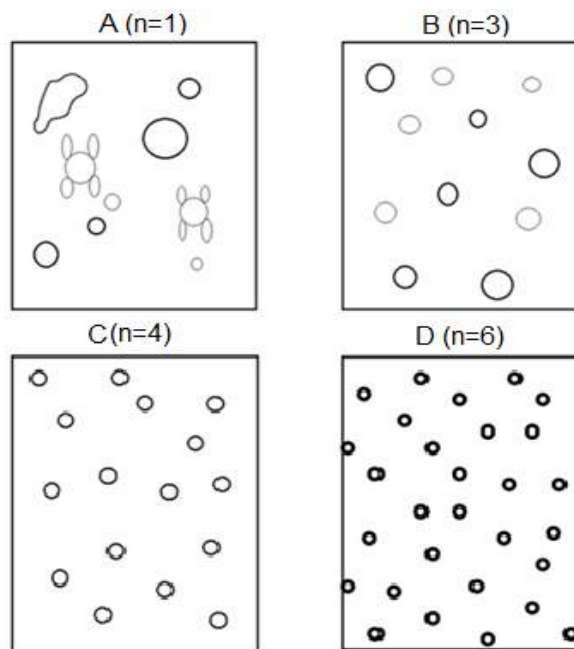


Рис. 2. Виды и размеры полученных мод при различных значениях количества циклов диспергирования на стенде



Следует ввести относительное значение коэффициента качества  $\psi = \frac{A}{A_{и}}$ , имея в виду, что для идеально приготовленной эмульсии достижима мода  $d_{и} = 8\text{мкм}$  при соответствующем значении коэффициента качества  $A_{и} = \frac{1,5}{d_{и}}$ .

Можно предложить следующую временную диаграмму (Рис. 3), по которой на базе расчетно-экспериментального материала возможно оценить стабильность во времени и качество ВТЭ.

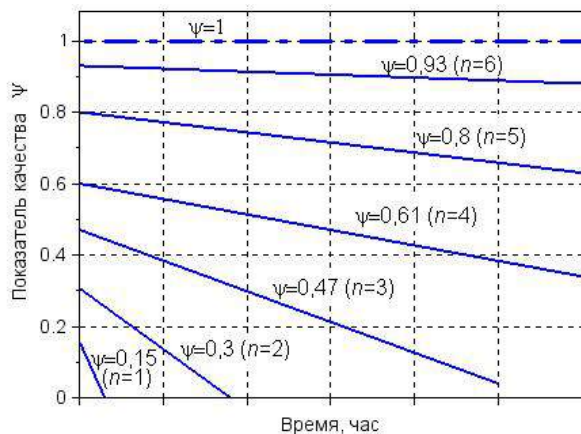


Рис.3. Диаграмма стабильности ВТЭ

Тогда относительное значение коэффициента качества ВТЭ  $\psi = \frac{A}{A_{и}} = \frac{8}{d}$ , а его максимальное значение составит величину  $\psi = 1$ . И это есть так называемая «идеальная» эмульсия, которая стабильна во времени.

По оси абсцисс отложено время коагуляции частиц воды в эмульсии, т.е. ее стабильность как двухфазной среды от времени. Значения относительного значения коэффициента качества должно определяться экспериментально для каждого значения  $n$  по результатам обработки отобранных проб ВТЭ.

На практике уже пришли к решению об использовании эмульсии сразу же после ее приготовления с установкой транзитного блока (модуля) приготовления. Можно утверждать, что при этом частично снимается вопрос о стабильности эмульсии во времени. Представленные выше экспериментальные результаты позволяют утверждать, что достаточно обеспечить  $n=3...5$  для обеспечения хорошего качества ВТЭ при  $\psi = 0,5...0,6$ . Безусловно, модуль должен быть автоматизирован, обеспечивать контроль качества эмульсии, например, с устройством по патенту [4] и установлен в непосредственной близости к насосу высокого давления топлива.

Для тяжелых топлив ВТЭ следует получать при нагреве до температуры 70...80°С с последующим охлаждением для фиксирования качества эмульсии, что способствует обеспечению высоких значений коэффициента качества.

### Выводы

Все вышеизложенное позволяет утверждать, что ВТЭ является альтернативным топливом. Многие вопросы приготовления эмульсии, определения ее физико-механических и электрических свойств требуют дальнейшей проработки. По результатам выполненной работы можно констатировать следующее:

- предложен метод оценки качества ВТЭ;
- показаны новые существенные свойства ВТЭ;
- предложен способ оценки устойчивости ВТЭ во времени.

Необходимо также решить ряд практических задач, связанных с изменением активного хода плунжера, автоматического изменения ограничения максимальной подачи при переходе с эмульсии на дизельное топливо и перенастройки соответственно системы автоматического регулирования частоты вращения. Это позволит соответственно реализовать все необходимое для практического использования эмульсии в эксплуатации. Положительный эффект от применения ВТЭ не вызывает сомнений.

### Литература

1. Кича Г.П. Теоретические основы расчета и интенсификации очистки топлив и масел в ДВС фильтрованием // Двигателестроение. 1986. - № 5. С. 25-29.
2. Надежкин А.В., Кича Г.П., Семенюк Л.А. Организация режимов комбинированной очистки моторного масла в судовых дизелях методом вариационного исчисления // Морские интеллектуальные технологии. 2017. - № 3 (37), Т. 1. С. 93-100.
3. Кича Г.П., Перминов Б.Н., Надежкин А.В., Завадский С.А. Моделирование изнашивания судовых тронковых дизелей при использовании моторных масел // Трение и износ. 2004. - № 6, Т. 25. С. 635-641.
4. Горелик, Г.Б. Возможности и перспективы применения водотопливных эмульсий в судовых дизелях в качестве альтернативного топлива / Г.Б. Горелик, А.Ю. Коньков, Е.И. Кончаков // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – №3(37). – Т.2. – С. 101–107.
5. Блинов В.И., Файнберг Е.Л. О пульсации струи и разрыве ее на капли// ЖТФ, вып.5.1933.
6. Установка для приготовления водотопливной эмульсии / Г.Б. Горелик, А.Г. Подтероб, В.И.Боярчук. – Патент на изобретение №2174864. Патентообладатель Хабаровский государственный технический университет,
7. Установка для приготовления водотопливной эмульсии непрерывного действия / Г.Б. Горелик, В.А. Чернышев, А.Ю. Чистяков // Патент на изобретение № 2319537. Патентообладатель ГОУ ВПО «ТОГУ». Заявка № 2003100478/15. Приоритет изобретения 08.01.2003. Опубликовано 20.03.2008. Бюл. № 8. – 6с.
8. Лебедев О. Н., Сомов В. А., Сисин В. Д. Водотопливные эмульсии в судовых дизелях. Л.: Изд-во «Судостроение». 1988. 328 с.

## References

1. Kicha G.P. Teoreticheskie osnovy rascheta i intensivifikacii oчитki topliv i masel v DVS fil'trovaniem [Theoretical basis for calculating and intensifying the purification of fuels and oils in the ICE by filtration]. *Dvigatelsestroenie*. No.5 (1986), P. 25-29.
2. Nadezhkin A.V., Kicha G.P., Semenyuk L.A. Organizaciya rezhimov kombinirovannoj oчитki motornogo masla v sudovyh dizelyah metodom variacionnogo isчисleniya [Organization of modes of combined cleaning of engine oil in marine diesel engines by the method of the calculus of variations]. *Marine Intellectual Technologies*. No.3 (2017), Vol.2, P. 93–100.
3. Kicha G.P., Perminov B.N., Nadezhkin A.V., Zavadskij S.A. Modelirovanie iznashivaniya sudovyh tronkovykh dizelej pri ispol'zovanii motornyh masel [Modeling the wear of ship's trunk diesels using motor oils]. *Friction and wear*. No. 6 (2004), P. 635-641.
4. Gorelik G.B., A.Yu. Konkov, E.I. Konchakov. Vozmozhnosti i perspektivy primeneniya vodotoplivnyh jemul'sij v sudovyh dizeljah v kachestve al'ternativnogo topliva [The opportunities and the perspectives using of water-fuel emulsions for marine diesels as alternative fuel]. *Marine Intellectual Technologies*. No.3 (2017), Vol.2, P. 101–107.
5. Blinov V.I., Faynberg E.L. O pul'satsii strui i razryve ee na kapli [About ripple stream and breaking it into droplets] (1933), *ZhTF*, 5.
6. Ustanovka dlya prigotovleniya vodotoplivnoy emul'sii [Installation for the preparation of water-fuel emulsions]: *patent* No. 2174864 *Russian Federation*, 2001.
7. Ustanovka dlya prigotovleniya vodotoplivnoy emul'sii nepreryvnogo deistviya [Installation for the preparation of a continuous water-fuel emulsion]: *patent* No. 2319537 *Russian Federation*, 2008.
8. Lebedev O. N., Somov V. A., Sisin V. D. Vodotoplivnye emul'sii v sudovykh dizelyakh [Water-fuel emulsions in marine diesel engines]. *Leningrad, Sudostroenie*, 1988. 328 p.

УДК 629.12.002 + 620.9

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ГЛУБИНЕ ОЧИСТКИ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ РЕГЕНЕРИРОВАННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ РАЗНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ГРУПП

**Валерий Васильевич Тарасов**

профессор кафедры Судовые двигатели внутреннего сгорания  
Морской государственной университет им. адм. Г.И Невельского  
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а  
тел.: 8 (902) 064-11-64; e-mail: vtarasov@msun.ru

**Анатолий Николаевич Соболенко**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры Судовые двигатели внутреннего сгорания  
Морской государственной университет им. адм. Г.И Невельского  
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а  
тел.: 8 (950) 286-57-03; e-mail: sobolenko\_a@mail.ru

### Аннотация

Отработанные моторные масла после регенерации можно использовать в двигателях судовой энергетической установки с понижением моторной группы масла. Также их эксплуатационные свойства можно восстанавливать легированием специальными многофункциональными присадками до уровня свежих моторных масел. Регенерация отработанных моторных масел в установке РУМС-1, по схеме автора, позволяет снизить концентрацию нерастворимых примесей до 0,05 %, полностью удалить из них воду и топливо. Глубокая очистка регенерированных масел до полного удаления НРП не способствует улучшению противоизносных и моюще – диспергирующих восстановленных на их основе нефтепродуктов. Так как полное удаление мелкодисперсной фазы нерастворимых загрязнений из регенерированных масел микрофильтрацией или при сепарировании в интенсивном центробежном поле способствует удалению находящихся в коллоидном состоянии большинства присадок типа МАСК, ППС и некоторых модификаторов трения, что приводит к ухудшению эксплуатационных свойств восстановленных регенерацией отработанных моторных масел.

**Ключевые слова:** планирование эксперимента, группы моторных масел, отработанное моторное масло, глубина очистки масла, механические примеси

## RECOMMENDATIONS FOR CLEANING DEPTH FROM MECHANICAL IMPURITIES THE REGENERATED MOTOR OILS OF THE VAREOUS OPERATING GROUPS

**Valery V. Tarasov**

Professor of department of Ship power installations  
Maritime state university named Admiral Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: 8 (902) 064-11-64; e-mail: vtarasov@msun.ru

**Anatoly N. Sobolenko**

Professor, Dr.Sci.Tech.,  
Professor of department of Ship power installations  
Maritime state university named Admiral Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: 8 (950) 286-57-03; e-mail: sobolenko\_a@mail.ru

### Abstract

The used motor oils after regeneration can be used in engines of the ship power plant with a decrease in the engine oil group. Also, their performance properties can be restored by doping with special multifunctional additives to the level of fresh motor oils. Regeneration of used motor oils in the RUMS-1 unit, according to the author's scheme, allows to reduce the concentration of insoluble impurities to 0.05%, completely removed water and fuel from them. Deep cleaning of the regenerated oils before complete removal of the NRP does not contribute to the improvement of anti-wear and detergent-dispersant refined petroleum products. Since the complete removal of the finely dispersed phase of insoluble contaminants from the regenerated oils by microfiltration or separation in an intensive centrifugal field contributes to the elimination of most of the МАСК и ППС, and some friction modifiers found in the colloidal state, which leads to a deterioration in the performance of regenerated motor oils.

**Key words:** experiment planning, motor oil groups, used motor oil, oil cleaning depth, mechanical impurities

**Введение**

Известны случаи серьезных аварий судовых дизелей из-за снижения в эксплуатации качества моторного масла [1]

Важным фактором в обеспечении безопасной эксплуатации судовых дизелей на регенерированном отработанном моторном масле (ОММ) является соблюдение условий содержания в регенерированном масле остаточных мелкодисперсных нерастворимых механических примесей (НРП) [2,3]. Это необходимо для сохранения несработавшей части многофункциональных присадок, которые обволакивают за счет своих свойств мелкодиспергированные НРП. В свою очередь мелкодиспергированные НРП не представляют угрозы для изнашивания триботехнических сопряжений дизеля, так как по размерам значительно меньше эксплуатационных зазоров в узлах трения ДВС [3].

Целью проведенных исследований результаты которых представлены в данной статье была разработка рекомендации по обеспечению требуемой оптимальной глубины очистки ОММ от НРП в зависимости от их моторных групп. Эти группы имеют различный уровень эксплуатационных свойств. Рекомендации работают не только для моторных масел (ММ) выделенных групп, но и для всех свежих масел, у которых группа эксплуатационных свойств, обозначенная рангом М может идентифицироваться через зольность фугата ( $Z_m$ , %) и щелочность ( $Щ_0$ , мг КОН/г) [3].

**1. Объекты испытаний и результаты экспериментальных исследований**

Применение методов оптимального планирования эксперимента с целью получить математическую модель многомерного процесса удаления НРП при регенерации отработанных моторных масел разных эксплуатационных групп, применяемых в судовых дизелях реализовано в работе [3].

Имеются исследования [7,9], которые показывают, что с позиций износных свойств отработанных ММ, полностью удалять из них НРП нет необходимости. Определяя глубину очистки масла, важно учитывать: абразивность НРП, их дисперсный состав, соотношение сгораемых и минеральных (несгораемых) компонентов нерастворимых примесей. Обоснованных рекомендаций по данному вопросу нет.

Для разработки рекомендаций использовали результаты эксперимента для трех групп моторных масел, которые приведены в работах [3,6].

Модели процессов изнашивания трибосопряжений дизеля при работе на указанных маслах после регенерации как функция отклика (износ  $I$  в относительных единицах) представлены в виде полинома второй степени, в соответствии с рекомендациями [5]:

$$y = 101,5 - 24,15x_1 - 19,7x_2 + 11,12x_1x_2 + 15,28x_1^2 + 5,13x_2^2. \quad (1)$$

На графике (Рис. 1) представлены зависимости  $J$  – скорости изнашивания роликов для регенерированных масел разного качества (износа  $I$  от свойств моторной группы) в зависимости от

коэффициента их регенерации, который в какой-то мере связан с остаточной концентрацией НРП в ММ [3,8].

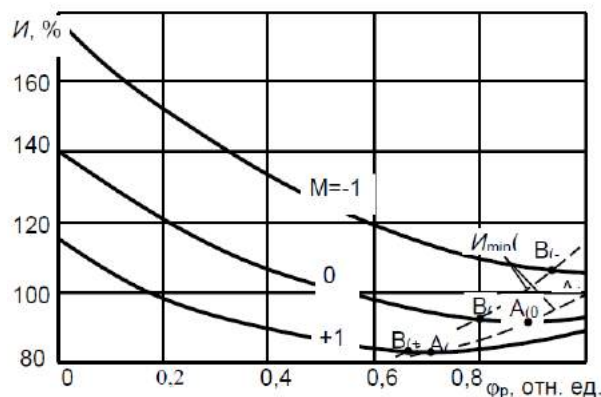


Рис. 1. Зависимость износа от коэффициента регенерации отработанного масла

По графику можно заключить, что для регенерированных масел допустимо остаточное загрязнение масел нерастворимыми примесями, которое может составлять в зависимости от группы ММ 0,2...0,8 %. Эти показатели центробежным сепарированием легко достигаются.

На графике (Рис. 1) зависимостей  $I(\phi_r)$  линиями  $I_{(min)(\phi_r)}$  на для свойств масел разных эксплуатационных групп выделяются участки со значениями  $\phi_{r(opt)}$ , на которых износ минимален. Правая точка  $A_i$  пересечения кривых  $I(\phi_r)$  соответствует их экстремуму. Левая  $B_i$  – допустимому значению остаточного загрязнения НРП отработанных ММ для групп  $G_2$  и  $D_2$  с разным уровнем щёлочности. Снижение износных свойств отработанных масел в наибольшей мере проявляется до коэффициента регенерации, равного 0,6. Дальнейшее его повышение, особенно для масел со щёлочностью более 20 мг КОН/г, эффекта не даёт.

Увеличение коэффициента регенерации  $\phi_r$  более 0,5 для масел группы  $D_2$  не приводит к значительному снижению  $I$ . Эффект может составить не более 10 %.

**2. Расчеты оптимальных уровней глубины очистки ОММ от НРП и разработка рекомендаций для масел разных моторных групп**

Пределы центрифугирования отработанных масел по их коэффициенту регенерации могут быть найдены путем исследования зависимости (1) на экстремум. Для этого необходимо взять первую производную по  $dy/dx_1$  и приравнять её нулю:

$$\frac{dy}{dx_1} = 24,15 + 11,12x_2 + 2 \cdot 15,28x_1 = 0$$

$$x_{1(opt)} = \frac{25,12 - 11,12x_2}{30,56} = 0,79 - 0,36x_2. \quad (2)$$

Для отработанных масел с уровнем эксплуатационных свойств, закодированных как  $M = -1, 0$  и  $+1$  допустимо регенерацию проводить до  $x_1$ , соответственно равное 1,15, 0,79 и 0,43. При

достижении этих значений коэффициента регенерации дальнейшее углубление очистки отработанных масел от НРП не приводит к снижению их износных свойств. Для масла М-14-Г<sub>2</sub>(ц) в пределах рассматриваемого фактора пространства ( $x_1 = 0 - 1$ ) экстремума не наблюдается, что указывает на необходимость очистки этого продукта до достижения предела центрифугирования ( $x_{ост} = 0,2 - 0,3$  %) см. данные эксперимента [4].

Для масел группы Д<sub>2</sub> стабилизация  $J$  наблюдается при  $x_1 > x_{1(opt)}$ , т.е. для М = 0 она происходит когда  $x_1$  становится больше 0,79. При очистке масла М = +1 стабилизация  $J$ , как показал однофакторный эксперимент, происходит при  $x_1 \geq 0,43$  [8].

Окончательные рекомендации по обеспечению требуемой глубины очистки отработанных масел в зависимости от их качества представлены в таблице 1. Рекомендации работают не только для масел выделенных групп, но и для всех свежих масел, у которых группа эксплуатационных свойств М может идентифицироваться через зольность фугата ( $Z_m$ , %) и щелочность ( $Щ_0$ , мг КОН/г) следующими соотношениями [8]:

$$M = \frac{Щ_0 - 20}{10}, \quad M = \frac{Z_m - 3,0}{1,5}.$$

Применительно к судовым унифицированным свежим ММ, эксплуатационные свойства которых идентифицируются показателем  $Щ_0$  и  $Z_m$  или их совокупностью, уравнение (1) может быть трансформировано в зависимости следующего вида:

$$И = 140,9 - 109,32\varphi_p - 30,9M + 22,24\varphi_p M + 61,12\varphi_p^2 + 5,13M^2, \quad (3)$$

$$И = 223,2 - 153,8\varphi_p - 5,142Щ_0 + 2,224\varphi_p Щ_0 + 61,12\varphi_p^2 + 0,0512Щ_0^2, \quad (4)$$

$$И = 223,2 - 153,8\varphi_p - 20,63M + 14,82\varphi_p + 6,2\varphi_p^2 + 2,273M^2. \quad (5)$$

В этом случае ограничения по требуемой глубине очистки отработанных масел рассматриваемых групп Г<sub>2</sub> и Д<sub>2</sub>, задаваемой коэффициентом  $\varphi_{p(opt)}$  регенерации могут быть рассчитаны по формулам:

$$\varphi_{p(opt)} = 0,894 - 0,182M, \quad (6)$$

$$\varphi_{p(opt)} = 1,258 - 0,183Щ_0, \quad (7)$$

$$\varphi_{p(opt)} = 1,258 - 0,1212Z_m. \quad (8)$$

Значение этих коэффициентов регенерации для масел с низким уровнем моюще-диспергирующих свойств близко к единице, что указывает на необходимость полной их очистки от крупнодисперсных НРП вплоть до предела центрифугирования, когда в регенерированном масле остаются дисперсные фазы с размерами частиц менее 7 мкм. Остаточное загрязнение НРП отработанных регенерированных масел более высших эксплуатационных групп (например Д<sub>2</sub>) может быть выше. Этот уровень концентрации мелкодисперсных НРП не окажет заметного влияния на износные свойства регенерированных и восстановленных масел (Таблица 1).

Таблица 1

Рекомендуемый уровень регенерации отработанных масел и допустимого остаточного их загрязнения НРП

Моторное масло	Характеристика свежего масла		Применяемое топливо	Форсирование дизеля по $p_{тв}$ , МПа	Коэффициент регенерации $\varphi_p$ , отн. ед.	Остаточное загрязнение $S_{ост}$ , % масс.
	Щёлочность $Щ_0$ , мг КОН/г	Зольность $Z_m$ , % масс				
М-10-Г <sub>2</sub> (ц) М-14-Г <sub>2</sub> (ц) М-16-Г <sub>2</sub> (ц)	8–12	1,2–1,6	Л-0,2-61 СМТ ТГВК	0,8–1,2	0,9	0,1–0,2
М-10-Д <sub>2</sub> (цп20) М-14-Д <sub>2</sub> (цп20)	18–23	2,8–3,2	СЛ, ДГ Ф6, Ф12 М-40В	1,2–1,8	0,8–0,9	0,3–0,5
М-14-Д <sub>2</sub> (цп30) М-16-Д <sub>2</sub> (цп30)	27–32	4,2–4,8	СВТ ДМ М-100	1,2–2	0,7–0,8	0,4–0,8

**Заключение**

1. На основе критерия изнашивания получены выражения для расчета требуемого коэффициента регенерации отработанных масел и допустимой глубины их очистки от нерастворимых загрязнений, при которых эксплуатируемые свойства восстановленных легированием присадок ММ будут находиться на уровне характеристик свежего продукта соответствующей группы.

2. Коэффициент регенерации отработанных масел по нерастворимым примесям в зависимости от их эксплуатационных свойств для группы Г<sub>2</sub> с начальной зольностью 1,2...1,6 % и щёлочностью 8...12 мг КОН/г составляет 0,9...1, Д<sub>2</sub> с зольностью 1,2...1,6 % и щёлочностью 9...12 мг КОН/г – 0,8...0,9, Д<sub>2</sub> с зольностью 4,2...4,8 % и щёлочностью 27...32 мг КОН/г – 0,7...0,8. При этом остаточное загрязнение регенерированных масел мелкодисперсной нерастворимой фазой может составлять 0,1...0,8 %.

3. Эксплуатационными испытаниями подтверждено, что при предлагаемой глубине очистки отработанных ММ от нерастворимых примесей противозносные и моюще-диспергирующие свойства восстановленных на их основе продуктов соответствуют уровню свежих масел соответствующих групп. Это обусловлено переходом в восстановленное масло вместе с остаточными НРП части нерастворимых многофункциональных присадок к моторным маслам.

4. Полученные математические модели с достаточной достоверностью подтверждаются результатами многофакторного эксперимента, поэтому их рекомендуется использовать для расчета параметров эффективности процессов регенерации ОММ, исходя из начальных эксплуатационных свойств моторных групп используемых масел и обеспечения эффективного сбережения горючесмазочных материалов в СЭУ.

**Литература**

1. Маницын В.В., Соболенко А.Н. Анализ повреждений рамовых подшипников двигателей 8NVD48A-2U на промысловых судах. Вестник ГУМРФ им. адм. С.О. Макаров. Выпуск 6 (40). 2016 г. С. 150-155.
2. Тарасов В. В. Проблемы утилизации и регенерации отработанных смазочных материалов на судах: пути их решения восстановлением моторных свойств и повторным использованием в судовых дизелях / В. В. Тарасов // Сб. науч. тр. конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2010». – Одесса : Транспорт, 2010. – Т. 1. – С. 65–71.
3. Тарасов В. В. Обоснование глубины очистки отработанных моторных масел от механических примесей при их регенерации и повторном использовании в СЭУ / В. В. Тарасов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2016. – № 3, 4 – С. 99–108.
4. Кича Г. П. Эффективность применения в судовых дизелях регенерированных восстановленных отработанных моторных масел / Г.П. Кича, В.В. Тарасов, Е.М. Деревцов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2016. – № 1,2. – С. 83–91.
5. Кича Г. П. Регенерированные отработанные моторные масла и восстановление их эксплуатационных свойств на судах / Г. П. Кича, В. В. Тарасов, С. В. Глушков // Морские интеллектуальные технологии : сб. науч. тр. – 2016. – № 3 (33). – Т. 1. – С. 126–132.
6. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.
7. Надёжкин, А.В. Имитационная модель трибодиагностики двигателей внутреннего сгорания / А.В. Надёжкин, А. В. Безвербный, Г. П. Кича // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2009. – № 3. – С. 6–14.
8. Кича Г. П. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях / Г. П. Кича, Б. Н. Перминов, А. В. Надёжкин. – Владивосток : Мор. гос. ун-т, – 2011. – 372 с.
9. Кича Г. П. Триботехнические характеристики нерастворимых продуктов загрязнения моторных масел и их влияние на износ дизеля / Г. П. Кича, Г. М. Липин, С. П. Полоротов // Трение и износ. – 1998. – № 6. – Т. 7. – С. 1068–1078.

#### References

1. Manitsyn V.V., Sobolenko F.N.. Analysis of bedplate bearings damage of 8NVD48A-2U fishing vessels. Bulletin GUMRF named after Adm. S.O. Makarov. Issue 6 (40). 2016, pp. 150-155.
2. Tarasov, V. V. Problems of recycling and regeneration of used lube oil on ships: their solutions restoration of motor properties and re-use in marine diesel engines / V.V. Tarasov // Proc. scientific. Tr. Conf. "Modern directions of theoretical and applied research 2010". - Odessa: Transport, 2010. - Vol. 1. - P. 65-71.
3. Tarasov V. V. Justification of the purification of used motor oils from mechanical impurities during their regeneration and re-use in SEU / V. V. Tarasov // Scientific transport problems of Siberia and the Far East. – 2016. - №3,4. - P. 99-108.
4. Kicha, G. P. Effectiveness of application in marine diesel engines the reg-narisovannyi recovered used motor oil / G. P. Kicha, V. V. Tarasov, E. M. Derevtsov // Scientific transport problems of Siberia and the Far East. – 2016. - №1,2. - P. 83-91.
5. Kicha G. P. Regeneration of used motor oils and restoration of their operational properties on ships /G. P. Kicha, V. V. Tarasov, S. V. Glushkov // Marine intellectual technologies. – 2016. – No. 3 (33), vol.1. - P. 126-132.
6. Spiridonov, A. A. Design of experiments in the study of technological processes / A. A. Spiridonov. - M.: Engineering, 1981. - 184 p.
7. Kicha, G. P. Simulation of the lubrication of triborate stresses and wear of the main parts of internal combustion engines / G. P. Keech, A. V. Nadezhkin, B. N. Perminov // Transport case of Russia. – 2004. – No. 2. - P. 51-53.
8. Kicha, G. P. Sustainable oil used in marine diesel engines / G. P. Kicha, B.N. Perminov, A. V. Nadezhkin // Vladivostok: Mor. state un-ta, 2011. - 372 p.
9. Kicha, G. P. Tribological properties of insoluble products contamination of engine oils and their effect on wear of diesel / G. P. Kicha, G. M. Lipin, S. P. Polorotov // Friction and wear. – 1998. – Vol. 7, No. 6. - P. 1068-1078.



УДК 620.197.5

**ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ  
СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА****КАТОДНАЯ ЗАЩИТА СВАЙНОГО ПИРСА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ****Борис Борисович Чернов**

доктор химических наук, профессор  
профессор кафедры Химии и экологии  
Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: 8 (423) 230-12-54, e-mail: chernov@msun.ru

**Ван Мынг Ву**

аспирант  
Морской Государственный университет им. адм. Г.И.Невельского,  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
Вьетнамский морской университет, Хайфон, Вьетнам  
180000, Вьетнам, г. Хайфон, ул. Лаччау, д. 484  
тел.: 8 (423) 230-12-54, e-mail: vumungmtb@gmail.com

**Анас Масхарович Нугманов**

научный сотрудник  
Морской Государственный университет им. адм. Г.И.Невельского,  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: 8 (423) 230-12-54, e-mail: alexnugmanov@mail.ru

**Людмила Юрьевна Фирсова**

кандидат химических наук  
доцент кафедры Химии и экологии  
Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: 8 (423) 230-12-54, e-mail: alexnugmanov@mail.ru

**Аннотация**

В работе представлены результаты прямых экспериментов по катодной защите свайного пирса с использованием солнечных панелей в качестве автономных источников электрохимической защиты. Для определения величины плотности катодного тока, которая позволила бы в светлое время суток нарастить солевое покрытие на защищаемом объекте, обеспечивающее надежную защиту от коррозионного разрушения в темное время суток, когда объект лишен электрохимической защиты, была использована специальная схема, позволяющая регулировать плотность защитного тока на испытуемых образцах. Схема включала в себя солнечную панель, преобразователи напряжения для отдельного питания схемы защиты через калиброванные резисторы и модуля задержки. Модуль задержки предназначен для устранения нежелательных выключений при наступлении светлого времени суток и, соответственно, нежелательных включений с наступлением темноты.

Расчетные параметры катодной защиты отработаны при помощи схемы катодной защиты стальных образцов и модуля задержки с отдельным питанием. Определены оптимальные значения плотности катодного тока, позволяющие эффективно защитить от коррозионного разрушения стальные конструкции пирса в природной морской воде.

**Ключевые слова:** коррозия, катодная защита, солнечная панель, коррозионные испытания

**CATHODIC PROTECTION OF THE PILE PIER  
WITH THE USE OF SOLAR PANEL****Boris B. Chernov**

professor, Dr. Sci. Chemistry  
Professor of Department of Chemistry and ecology  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: 8 (423) 230-12-54, e-mail: chernov@msun.ru

**Van M. Vu**

Post-graduate student  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
Vietnam Maritime University, Haiphong, Vietnam  
484 Lach Tray str., 180000, Haiphong, Vietnam  
tel.: 8 (423) 230-12-54, e-mail: vumungmtb@gmail.com

**Anas M. Nugmanov**

Research scientist

Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: 8 (423) 230-12-54, e-mail: alexnugmanov@mail.ru

**Lyudmila Yu. Firsova**

Cand. Sci. Chemistry

Senior lecturer of Department of Chemistry and ecology  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: 8 (423) 230-12-54, e-mail: alexnugmanov@mail.ru

**Abstract**

The paper presents the results of direct experiments on the cathodic protection of a pile pier using solar panels as autonomous sources of electrochemical protection. In order to determine the magnitude of the cathode current density, which would allow increasing the deposits on the protected steel during daylight hours, providing reliable protection against corrosion damage in the dark time, when the object was lack of electrochemical protection, a special scheme was used to adjust the protective current density on the samples. The circuit included a solar panel, voltage converters for separate power supply of the protection circuit through calibrated resistors and a delay module. The delay module was designed to eliminate unwanted shutdowns at the onset of daylight and, accordingly, unwanted opens at dark time.

The calculated parameters of cathodic protection have been developed using the cathodic protection scheme for steel samples and the delay module with separate power supply. The optimum values of cathode current density are determined, which made it possible to effectively protect steel structures of pier in natural seawater from corrosion destruction..

**Key words:** corrosion, cathodic protection, solar panel, corrosion test

**Введение**

Для определения величины плотности катодного тока, которая позволила бы в светлое время суток нарастить солевое покрытие на защищаемом объекте, обеспечивающее надежную защиту от коррозионного разрушения в темное время суток, когда объект лишен защитного потенциала, была использована схема, представленная на схеме (Рис.1). Схема включала в себя солнечную панель 1, преобразователи напряжения 2 и 3 для раздельного питания схемы защиты через калиброванные резисторы R1÷R4 и модуля задержки 4. Модуль задержки предназначен для устранения нежелательных выключений при наступлении светлого времени суток и, соответственно, нежелательных включений с наступлением темноты.

В отличии от ранее предложенных схем [1÷3] данная схема отличается именно включением в нее модуля задержки.

**1. Расчет схемы катодной защиты**

$U_1$ : 0... 20 В (солнечная панель – поз.1 по схеме, Рис.1).

$U_2$ : 3,0... 20 В / 12,0 В (DC/DC, преобразователь напряжения поз.2 по рис 1: включение – 2,9 В; отключение – 2,8 В. При  $U_{вх} = 2,9 \dots 20$  В  $U_{вых} = 12$  В.

Модуль задержки: напряжение питания – 12 В; время задержки  $t_{зад} = 7$  мин.

$U_3$ : 6,0... 20 В / 6,0 В (DC/DC, преобразователь напряжения – поз.3 по рис.1: рабочий диапазон – от 6,0 до 20 В, выходное напряжение 6 В)

Калиброванные резисторы:

$$R4 = R = 675 \Omega;$$

$$R3 = 2R = 1,35 \text{ k}\Omega;$$

$$R2 = 4R = 2,7 \text{ k}\Omega;$$

$$R1 = 8R = 5,4 \text{ k}\Omega.$$

Общее сопротивление  $R_{общ} = \frac{8}{15} \cdot R = 360 \Omega$ . Токи

через резисторы:  $I_{общ} = \frac{6,0\text{В}}{0,36\text{k}\Omega} = 16,7 \text{ mA};$

$$I_1 = \frac{1}{15} \cdot I_{общ} = 1,11 \text{ mA}$$

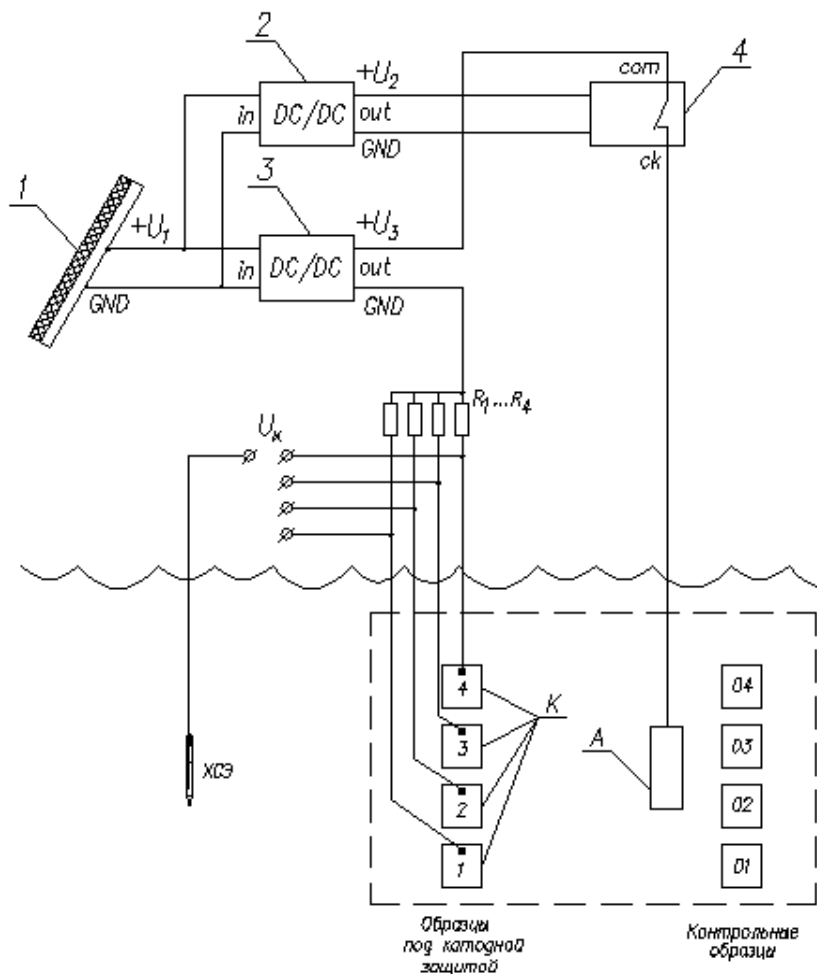


Рис. 1. Экспериментальная схема автоматической катодной защиты для отработки токовых режимов с двумя преобразователями напряжения и модулем задержки: 1 – солнечная панель; 2 – преобразователь напряжения №1; 3 – преобразователь напряжения №2; 4 – модуль задержки; А – анод (нерастворимый электрод),

К – катоды (1 ÷ 4 - образцы под катодной защитой); 01 ÷ 04 – контрольные образцы; ХСЭ – хлорсеребряный электрод сравнения; R<sub>1</sub>...R<sub>4</sub> – калиброванные резисторы

Соответственно плотности катодных токов будут иметь значения: 0,139; 0,278; 0,556 и 1,111 А/м<sup>2</sup>.

$$I_2 = \frac{2}{15} \cdot I_{общ} = 2,22 \text{ mA}; I_3 = \frac{4}{15} \cdot I_{общ} = 4,44 \text{ mA};$$

$$I_4 = \frac{8}{15} \cdot I_{общ} = 8,88 \text{ mA}.$$

В реальных морских условиях измеренные значения токов в момент постановки образцов примерно на 30% ниже (см. Таблицу 1).

Таблица 1

Токи на эквиваленте нагрузки и электродной системе  $R_{экс}^{общ} = R_{доб}^{общ} + R_{А-К}^{общ}$  ( $S_A = S_K = 80 \text{ см}^2$ );

$U_{А-К} = 5,86 \text{ В}; I_{А-К} = 11,43 \text{ mA};$  в бестоковом режиме  $\varphi_{А-К} = 0,58 \text{ В}$

<i>i</i>	<i>I<sub>i</sub></i> , mA	<i>i<sub>k,i</sub></i> , mA/м <sup>2</sup>	<i>R<sub>i,доб</sub></i> , кΩ	<i>R<sub>i,экс</sub></i> , кΩ ( <i>U</i> = 5,86 В)
1	0,76	95	5,4	7,69
2	1,52	190	2,7	3,84
3	3,05	380	1,35	1,92
4	6,10	760	0,675	0,96
	<i>I<sub>общ</sub></i> = 11,43 mA		$R_{доб}^{общ} = 0,675 \cdot \frac{8}{15} = 0,36 \text{ кΩ}$	$R_{экс}^{общ} = 0,96 \cdot \frac{8}{15} = 0,51 \text{ кΩ}$
			$R_{А-К}^{общ} = 0,51 - 0,36 = 0,15 \text{ кΩ} = 150 \text{ Ω}$	

С течением времени величины токов снижаются: в защищенных образцах вследствие формирования покрытия СКО, в контрольных - вследствие образования продуктов коррозии.

Использование такой сборки преследовало целью нахождение значений защитного катодного тока, позволяющих в светлое время суток сформировать на поверхности образцов такое количество солевых катодных отложений (СКО), которое позволило бы предохранить образцы от коррозионного разрушения в темное время суток в условиях отсутствия защитного тока.

Защитными свойствами обладают не только солевые катодные отложения, но и промежуточные продукты окисления железа.

Если на поверхности стальной конструкции имело место окисление железа до трехвалентного состояния (оксиды  $Fe_2O_3$ , оксигидроксиды  $FeOOH$ , гидроксид  $Fe(OH)_3$ ), то при катодной поляризации, когда к защищаемому объекту приложен отрицательный потенциал, возможно восстановление железа до магнетита  $Fe_3O_4$  (гидромагнетита  $Fe_3(OH)_8$ ), пленка которого также может выполнять защитную функцию.

## 2. Расчет коррозионных потерь и скорости коррозии

Коррозионные потери ( $d$ ) определялись по расчетной формуле

$$d = \frac{\Delta m}{\rho \cdot S} = \frac{\Delta m}{7,81 \cdot 80} = \frac{\Delta m}{624,8} \text{ (см)} = \frac{\Delta m}{62,5} \text{ (мм)}, \quad (1)$$

где  $\Delta m$  – потеря массы образца, г;

$S$  – площадь образца, см<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность ( $\rho = 7,81 \text{ г/см}^3$ ).

Исходя из коррозионных потерь, относительная скорость коррозии:

$$v = \frac{d}{t} = \frac{\Delta m}{62,5 \cdot t} \text{ (мм/год)}. \quad (2)$$

где  $\Delta m$  – потеря массы образца, г;  $t$  – продолжительность экспозиции, лет.



Рис.2. Внешний вид экспериментальной сборки

Значения скорости коррозии, полученные в ходе экспериментов, представлены в Таблице 2:

Таблица 2

### Экспериментальные данные

Образец	Плотность катодного тока, А/м <sup>2</sup>	Экспозиция, лет	Скорость коррозии, мм/год
1	0,095	0,189	0,102
2	0,19	0,189	0,078
3	0,38	0,293	0,0043
4	0,76	0,293	0,0037
01	-	0,189	0,123
02	-	0,189	0,104
03	-	0,293	0,115
04	-	0,293	0,127

Найдена оптимальная величина защитного тока – 0,38 А/м<sup>2</sup>.

Внешний вид катодно защищенного образца с солевым покрытием и контрольного образца (период экспозиции 0,293 года) показан на рис.3:

### 3. Катодная защита пирса по схеме с твердотельным реле тока

С использованием экспериментально найденных на опытной сборке токовых режимов для катодной защиты реального объекта (свайный пирс, сваи из стальных труб Ду180, общая защищаемая площадь 30,2 м<sup>2</sup>) была использована схема, представленная на рис.4.



Рис.3. Внешний вид образца, находившегося под катодной защитой (слева) и контрольного образца (справа)

Напряжение от солнечной панели 1 ( $U_1$ : 0... 20 В) подавалось на преобразователь 2 ( $U_2$ : 3,0... 20 В / 12,0 В) схемы питания модуля задержки 3, а после включения твердотельного реле Р1 по истечении времени задержки ( $t_{зад} = 7$  мин) – на защиту собственно стальных свай пирса (линия А – К).

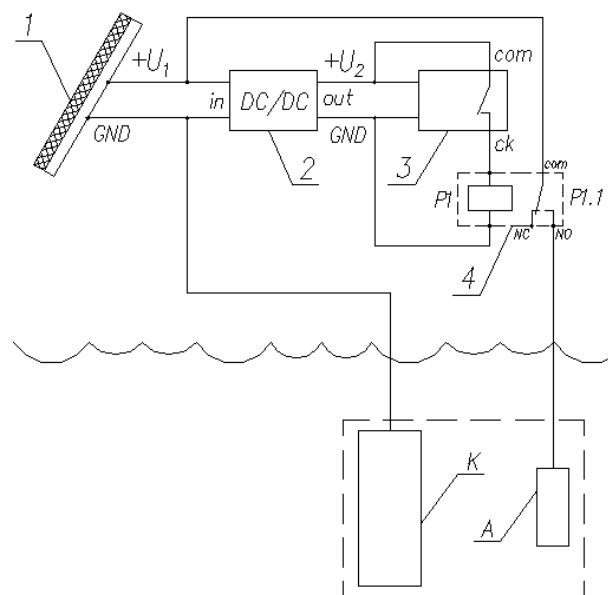


Рис.4. Схема катодной защиты свайного пирса с модулем задержки и твердотельным реле  
1 – солнечная панель; 2 – преобразователь напряжения; 3 – модуль задержки; 4 – твердотельное реле;  
А – анод (нерастворимый электрод), К – катод (катодно защищенный объект – свайный пирс)

Эффективная защита свайного пирса имеет место при плотностях катодного тока  $i_k = 0,38 \sim 0,4$  А/м<sup>2</sup>. Соответственно катодный ток защиты пирса должен быть не менее  $0,38 \text{ А/м}^2 \times 30,2 \text{ м}^2 = 11,5 \text{ А} \sim 12 \text{ А}$ .

Для катодной защиты стальных свай пирса были использованы две солнечные панели с выходными токами в светлое время суток 6-7 А/м<sup>2</sup>. Эффективность такой защиты – 30-кратное снижение скорости коррозии ( $v_{отн} = 0,004$  мм/год против  $v_{отн}^{(сп)} = 0,12$  мм/год).

#### Заключение

Представлена методика определения оптимальных значений плотности катодного для защиты стальных конструкций от коррозионного разрушения при эксплуатации в морских условиях с использованием солнечной панели в качестве источника защитного тока.

Предложена схема и токовые параметры катодной защиты реального объекта – пирса на стальных сваях.

#### Литература

1. Chernov B.B., Nugmanov A.M., Kovalenko R.G., Shchetinina G.P., Tabunshikov A.V. Electrochemical methods of protection against biofouling, icing, and corrosion of metal structures in the sea water. The 29<sup>th</sup> Asian Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures "TEAM-2015". Oct. 12-15, 2015. Vladivostok, Russia. Maritime State University named Admiral G.Nevelskoi. – P.546-551.
2. Чернов Б.Б., Нугманов А.М., Фирсова Л.Ю.. Использование солнечных панелей в катодной защите морских сооружений. III Межд. научн. конф. "Полярная механика", 27-30 сент. 2016, Владивосток, Россия. Матер. конф., с.610-617
3. Чернов. Б.Б., Нугманов А.М.. Солнечные панели в практике катодной защиты металлов. Морские интеллектуальные технологии, 2016, №3 (33), с.234-237

---

**References**

1. Chernov B.B., Nugmanov A.M., Kovalenko R.G., Shchetinina G.P., Tabunschikov A.V. Electrochemical methods of protection against biofouling, icing, and corrosion of metal structures in the sea water. The 29<sup>th</sup> Asian Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures "TEAM-2015". Oct. 12-15, 2015. Vladivostok, Russia. Maritime State University named Admiral G.Nevelskoi. – P.546-551.
2. Chernov B.B., Nugmanov A.M., Firsova L.Yu.. Use of solar panels in cathodic protection of sea constructions. III Int. Sci Conf. " Polar mechanics ", 27-30 Sept. 2016, Vladivostok, Russia. Mater. Conf., p.p. 610-617
3. Chernov B.B., Nugmanov A.M.. Solar panels in practice of cathodic protection of metals. Sea Intellectual Technologies, 2016, №3 (33), p.p. 234-237



УДК 620.197.5

## ФОРМИРОВАНИЕ СОЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА СТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЕ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В МОРСКОЙ ВОДЕ

**Борис Борисович Чернов**

доктор химических наук, профессор  
профессор кафедры Химии и экологии  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: 8 (423) 230-12-54, e-mail: chernov@msun.ru

**Ван Мынг Ву**

аспирант  
Морской Государственный университет им. адм. Г.И.Невельского,  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
Вьетнамский морской университет, Хайфон, Вьетнам  
180000, Вьетнам, г. Хайфон, ул. Лаччау, д. 484  
тел.: 8 (423) 230-12-54, e-mail: vumungmtb@gmail.com

**Анас Масхарович Нугманов**

научный сотрудник  
Морской Государственный университет им. адм. Г.И.Невельского,  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: 8 (423) 230-12-54, e-mail: alexnugmanov@mail.ru

**Людмила Юрьевна Фирсова**

кандидат химических наук  
доцент кафедры Химии и экологии  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: 8 (423) 230-12-54, e-mail: alexnugmanov@mail.ru

### Аннотация

В работе представлены результаты исследования процесса формирования солевых катодных отложений (СКО) при катодной защите стали в морской воде. Предложен метод расчета теоретически возможной наработки СКО и выхода по току при заданной плотности катодного тока, исходя из относительных скоростей формирования катодных отложений. Проведена экспериментальная проверка относительной скорости образования СКО в интервале плотностей катодного тока  $i_k = 0,5-15 \text{ A/m}^2$ , которая вначале монотонно возрастает, а при плотностях катодного тока  $i_k > 15 \text{ A/m}^2$  начинает уменьшаться вследствие выпадения осадка в объеме. Показано, что выход по току характеризуется резким ростом в области  $i_k = 0,5-4,0 \text{ A/m}^2$ , достигает максимума при плотности тока  $i_k = 4,0 \text{ A/m}^2$ , а затем плавно снижается. Методом нелинейного оценивания, исходя из данных, полученных при осаждении из модельных растворов, содержащих только кальций или только магний, определены зависимости для относительного содержания в СКО соответственно  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{Mg(OH)}_2$ . Аналогичным методом получены расчетные формулы, позволяющие оценить начальные плотности токов кристаллизации  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{Mg(OH)}_2$ , найти теоретически возможное количество каждого компонента СКО в морской воде и их выходы по току.

**Ключевые слова:** коррозия, катодная защита, солевой катодный осадок

## FORMATION OF SALT DEPOSITS ON A STEEL SURFACE AT CATHODIC PROTECTION OF ENGINEERING STRUCTURES IN SEA WATER

**Boris B. Chernov**

professor, Dr. Sci. Chemistry  
Professor of Department of Chemistry and ecology  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: 8 (423) 230-12-54, e-mail: chernov@msun.ru

**Van M. Vu**

Post-graduate student  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
Vietnam Maritime University, Haiphong, Vietnam  
484 Lach Tray str., 180000, Haiphong, Vietnam  
tel.: 8 (423) 230-12-54, e-mail: vumungmtb@gmail.com

**Anas M. Nugmanov**

Research scientist

Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: 8 (423) 230-12-54, e-mail: alexnugmanov@mail.ru

**Lyudmila Yu. Firsova**

Cand. Sci. Chemistry

Senior lecturer of Department of Chemistry and ecology  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: 8 (423) 230-12-54, e-mail: alexnugmanov@mail.ru

**Abstract**

The paper presents the study results of the formation of calcareous deposits during the cathodic protection of steel in seawater. A method is proposed for calculating the theoretically possible operating time of the deposits and current efficiency for a given cathode current density, based on the relative formation rate of deposits. Experimental verification of the relative formation rate of the deposits in the range of cathode current densities  $i_k = 0.5-15 \text{ A/m}^2$ , which initially monotonously increases with cathode current densities  $i_k > 15 \text{ A/m}^2$ , begins to decrease due to precipitation in the volume. It is shown that the current efficiency is characterized by a sharp increase in the region  $i_k = 0.5-4.0 \text{ A/m}^2$ , reaches a maximum at a current density of  $i_k = 4.0 \text{ A/m}^2$ , and then gradually decreases. Using the method of nonlinear estimation, based on the data obtained during the precipitation from model solutions containing only calcium or only magnesium, the dependences were determined for the relative content in the standard deviation of  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{Mg(OH)}_2$ , respectively. Using a similar method, computational formulas were obtained, which allow estimating the initial density of crystallization currents of  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{Mg(OH)}_2$ , finding the theoretically possible amount of each component of the deposits in sea water and their current efficiency.

**Key words:** corrosion, cathodic protection, calcareous deposit

**Введение**

Авторами проводились долгосрочные (до 5 лет) исследования коррозии судостроительных сталей (марки А, В, АН и ДН) в естественных морских условиях [1], которые позволили выявить, что скорость коррозии максимальна в начальный период, и есть локальное увеличение этой скорости в период 1-1,5 лет контакта сталей с морской водой (Рис.1).

Катодная защита стальных сооружений, контактирующих с морской водой, с начала контакта может существенно снизить эффект коррозионного разрушения. В этом смысле весьма актуально выявление закономерностей формирования солевых катодных отложений на стальной поверхности при катодной защите, что позволяет существенно снизить действие разрушающих факторов.

**1. Результаты и обсуждение**

Оборудование и материалы.

Катод – Ст3, пластина 50×80×1,5 мм.

Анод – платинированный титан  $Ti (Pt)$ , пластина 25×160×2,0 мм.

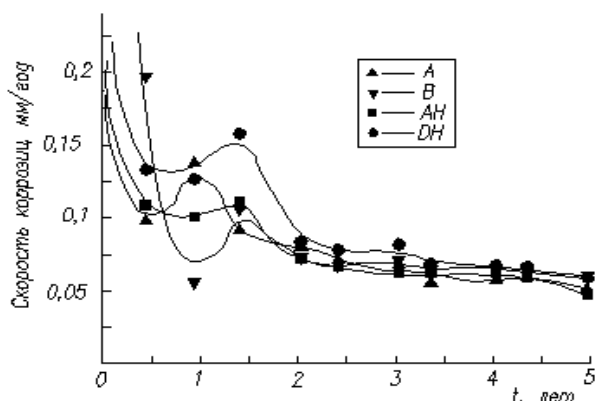


Рис.1. Скорость коррозии судостроительных сталей в условиях длительного контакта с морской водой [1]

Площадь катода и анода:  $S_k = S_a = 80 \text{ см}^2$  (плотности катодного и анодного токов равны).

Источник питания - Б5-50. Продолжительность электролиза – 4 часа. Запись катодного потенциала – Hantek-365.

Морская вода:

$$T = 25^\circ\text{C}, \text{ SAL} = 30\%; [\text{Ca}^{2+}] = 8,85;$$

$$[\text{HCO}_3^-] = 2,0; [\text{Mg}^{2+}] = 46,2;$$

$$[\text{SO}_4^{2-}] = 24,2 \text{ ммоль/л.}$$

Относительное содержание в СКО  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{Mg(OH)}_2$  в весовых долях - соответственно  $\mu_1$  и  $\mu_2$ , можно рассчитать, сравнивая количество осадка  $\Delta m_{\text{эксп}}$ , образующегося при фиксированных значениях плотности катодного тока и продолжительности электролиза или, сравнивая другие, зависимые от наработки масс, количественные характеристики – толщину покрытия  $\delta$ , скорость образования осадка.

В последнем случае - для относительной скорости формирования СКО  $V_{\text{отн}}$ , - продолжительность электролиза не принципиальна.

Функциональная зависимость  $\mu = f(i_k)$  весовых долей  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{Mg(OH)}_2$  при формировании СКО в морской воде может быть определена из результатов, полученных при электролизе модельных растворов, соответствующих по составу морской воде без кальция или без магния.

Например, расчет по толщине покрытия – соответственно  $\delta_1$  и  $\delta_2$  для  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{Mg(OH)}_2$ :

$$\mu_1 = \frac{\delta_1}{\delta_1 + \delta_2} \text{ и } \mu_2 = \frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \quad (1)$$

Аналогично для расчета по относительной скорости формирования СКО:

$$\mu_1 = \frac{v_{отн,1}}{v_{отн,1} + v_{отн,2}} \text{ и } \mu_2 = \frac{v_{отн,1}}{v_{отн,1} + v_{отн,2}} \quad (2)$$

Расчет весовых долей по зависимостям (2) не зависит от продолжительности электролиза, следовательно, такой расчет предпочтительней.

Данные, полученные на основе работ по раздельному осаждению карбоната кальция [2] и гидроксида магния [3], где весовые доли ( $\mu$ ) рассчитаны по (2), представлены в таблице 1.

**Таблица 1**  
**Относительные скорости формирования СКО и рассчитанные по ним весовые доли карбоната кальция и гидроксида магния в составе катодного покрытия**

Плотность катодного тока; $i_k$ , А/м <sup>2</sup>	CaCO <sub>3</sub>		Mg(OH) <sub>2</sub>	
	$v_{отн,1}$ , г/(м <sup>2</sup> ·ч)	$\mu_1$	$v_{отн,2}$ , г/(м <sup>2</sup> ·ч)	$\mu_2$
0,5	0,89	0,87	0,13	0,13
1,0	0,96	0,58	0,70	0,42
2,0	1,28	0,43	1,72	0,57
5,0	2,21	0,33	4,39	0,67

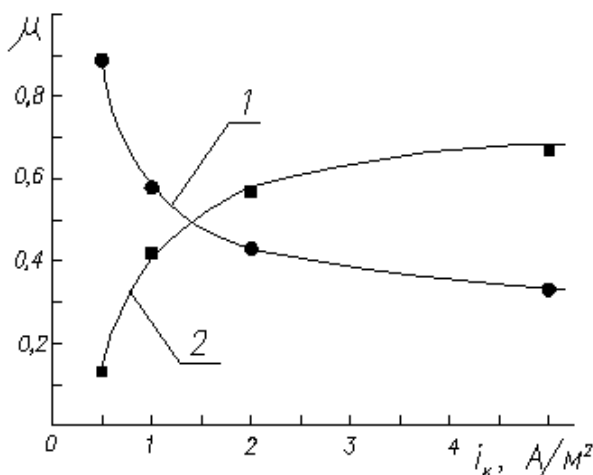
Экспериментальные данные, обработанные методом нелинейного оценивания, дали следующие зависимости. Для CaCO<sub>3</sub>:

$$\mu_1 = 0,31 + 0,88 \cdot \exp(-i_k) \quad (3)$$

Для Mg(OH)<sub>2</sub>:

$$\mu_2 = 0,69 - 0,88 \cdot \exp(-i_k) \quad (4)$$

Ход кривых (3) и (4)  $\mu(i_k)$  показан на рис.2:



**Рис.2. Относительное содержание в весовых долях CaCO<sub>3</sub> (1) и Mg(OH)<sub>2</sub> (2) в солевых катодных отложениях в зависимости от плотности катодного тока**

Максимальная наработка CaCO<sub>3</sub> ( $\mu_1 = 0,9$ ) имеет место при малых плотностях катодного тока (порядка 0,5 А/м<sup>2</sup>), при этом наработка Mg(OH)<sub>2</sub> минимальна ( $\mu_2 = 0,1$ ), поскольку значения токов начала

кристаллизации Mg(OH)<sub>2</sub> более, чем на порядок, превышают значения этого параметра для CaCO<sub>3</sub> [4].

При плотности катодного тока  $i_k = 1,5$  А/м<sup>2</sup> скорости формирования обоих составляющих катодных отложений становятся равными ( $\mu_1 = \mu_2 = 0,5$ ), а при дальнейшем увеличении плотности тока скорость образования CaCO<sub>3</sub>, которая лимитируется транспортом гидрокарбонатов к поверхности катода (при их не столь значительном содержании в морской воде  $[HCO_3^-] = 2,0$  ммоль/л), уменьшается незначительно, стабилизируясь на уровне  $\mu_1 = 0,3$ .

Относительное содержание CaCO<sub>3</sub> в СКО описывается нисходящей экспоненциальной зависимостью. Содержание же Mg(OH)<sub>2</sub> в солевых отложения подчиняется восходящей экспоненциальной зависимости (по крайней мере, в сравнимой области  $i_k = 0,5-5,0$  А/м<sup>2</sup>), при больших плотностях катодного тока скорость образования Mg(OH)<sub>2</sub> с увеличением плотности тока возрастает незначительно и стабилизируется на уровне  $\mu_2 = 0,7$ .

В данном случае процесс ограничивается чисто физическим механизмом, ограничений с транспортом к катоду компонентов, формирующих осадок, нет – просто формирующийся осадок, которого много, не способен весь закрепиться на поверхности катода и осаждается непосредственно в водной среде, окружающей катод.

**2. Расчет теоретически возможной наработки массы СКО и выхода по току**

Расчет производим, используя расчетные формулы, полученные ранее [2, 3], соответственно для CaCO<sub>3</sub>:

$$\Delta m_{расч} = 0,00373 \cdot I \cdot t \text{ (г)} = 3,73 \cdot I \cdot t \text{ (мг)} \quad (5)$$

Mg(OH)<sub>2</sub>:

$$\Delta m_{расч} = 0,00108 \cdot I \cdot t \text{ (г)} = 1,08 \cdot I \cdot t \text{ (мг)} \quad (6)$$

где  $I$  – ток в цепи, мА;  $t$  – продолжительность электролиза, час.

Расчетное значение массы формирующихся отложений в морской воде:

$$\Delta m_{расч} = (3,73 \cdot \mu_1 + 1,08 \cdot \mu_2) \cdot I \cdot t \quad (7)$$

Исходя из (7), подставляя выражения для  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – соответственно из (3) и (4), можно вычислить выход по току:

$$B_T = \frac{\Delta m_{эксп}}{\Delta m_{расч}} \cdot 100 = \frac{\Delta m_{эксп}}{(3,73 \cdot \mu_1 + 1,08 \cdot \mu_2) \cdot I \cdot t} \cdot 100 = \frac{10^{-3} \cdot \Delta m_{эксп}}{1,90 + 2,33 \cdot \exp(-i_k)} \cdot 100\% \quad (8)$$

где  $\Delta m_{эксп}$  – наработка СКО, мг;  $i_k$  – плотность катодного тока, А/м<sup>2</sup>;  $I$  – ток в цепи, мА;  $S$  – площадь катода, м<sup>2</sup>;  $t$  – продолжительность электролиза, час.

При больших токах, когда  $\exp(-i_k) \rightarrow 0$ , выход по току

$$B_T = \frac{10^{-3} \cdot \Delta m_{\text{экс}}}{1,90 \cdot i_k \cdot S \cdot t} \cdot 100 \% \quad (9)$$

Экспериментальные данные представлены в Таблице 2.

Таблица 2

Экспериментальные данные

№	Ток, I, mA	Плотн. тока, i, A/m <sup>2</sup>	Масса СКО, мг		Толщина покрытия, δ; мкм	Скорость формирования СКО, v; г/(м <sup>2</sup> ·ч)	Выход по току, B <sub>T</sub> , %
			Δm <sub>расч</sub>	Δm <sub>экс</sub>			
1	4,0	0,5	53,0	10,2	0,42	0,32	19,2
2	6,0	0,75	72,0	16,1	0,67	0,50	22,4
3	8,0	1,0	88,3	29,7	1,24	0,93	33,6
4	12	1,5	116,2	37,9	1,58	1,18	32,6
5	16	2,0	141,8	62,2	2,59	1,94	43,9
6	20	2,5	167,3	67,2	2,80	2,10	41,4
7	24	3,0	193,5	87,3	3,64	2,73	45,1
8	32	4,0	248,7	120,5	5,02	3,76	48,4
9	40	5,0	308,5	144,1	6,00	4,50	46,7
10	80	10	608,5	218,4	9,10	6,82	35,9
11	100	12,5	760,0	330,8	13,8	10,3	43,5
12	120	15	912,0	345,2	14,38	10,8	37,8
13	160	20	1216	310,9	12,95	9,72	25,6

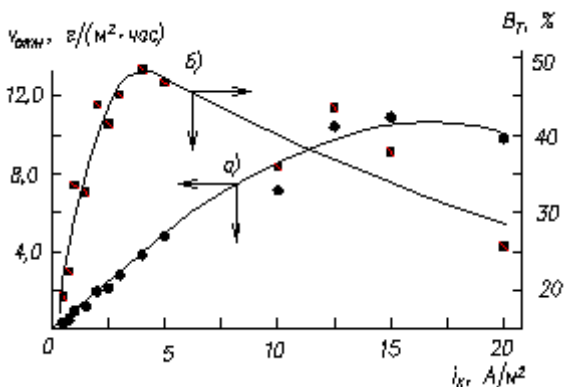


Рис.3. Зависимость относительной скорости наработки осадка (а) и выхода по току (б) от плотности катодного тока

Относительная скорость наработки СКО в интервале плотностей катодного тока  $i_k = 0,5-15 \text{ A/m}^2$  (Рис.3а) монотонно возрастает, при плотностях катодного тока  $i_k > 15 \text{ A/m}^2$  она начинает уменьшаться вследствие выпадения осадка в объеме.

Выход по току характеризуется резким ростом в области  $i_k = 0,5-4,0 \text{ A/m}^2$ , имеет максимум при плотности тока  $i_k = 4,0 \text{ A/m}^2$ , а затем плавно снижается (Рис.3б).

Экспериментальные данные для области монотонного возрастания относительной скорости формирования СКО ( $i_k = 0,5-15 \text{ A/m}^2$ ) позволяют рассчитать величину плотности катодного тока начала кристаллизации СКО на катодно защищенной стальной поверхности.

### 3. Расчет тока начала кристаллизации СКО при катодной защите стали в морской воде

Обработка экспериментальных данных зависимости относительной скорости формирования СКО  $v_{\text{отн}}$  от плотности катодного тока в интервале  $i_k = 0,5-15 \text{ A/m}^2$  методом нелинейного оценивания приводит к параболической зависимости

$$v_{\text{отн}} = a + b \cdot \sqrt{i_k} = -2,77 + 3,39 \cdot \sqrt{i_k}$$

(12 точек;  $i_k = 0,5-15 \text{ A/m}^2$ ;  $R = 0,986$ ).

Приравнявая полученное выражение нулю, можно определить величину плотности катодного тока начала кристаллизации:

$$-2,77 + 3,39 \cdot \sqrt{i_k} = 0$$

$$i_{\text{к.нк}} = \left( \frac{2,77}{3,39} \right)^2 = 0,817^2 = 0,668 \sim 0,67 \text{ (A/m}^2\text{)}$$

#### Выводы

1. Предложен метод расчета выхода по току для процесса формирования солевых отложений переменного состава ( $\text{CaCO}_3$  и  $\text{Mg(OH)}_2$ ) при катодной защите стали в морской воде.
2. Получены эмпирические зависимости, позволяющие рассчитать выход по току в зависимости от величины защитного тока/
3. Рассчитана величина плотности тока начала кристаллизации солевых отложений на катодно защищенной стальной поверхности.

**Литература**

1. Chernov B.B., Chaves I.A., Nugmanov A.M., Melchers R.E.. Comparative Marine Immersion Corrosion of Ship Construction Steels Exposed in Arctic and Temperate Waters. Corrosion & Prevention 2017. Paper 51. p.p.1-10. Newcastle (Australia).
2. Чернов Б.Б., Ву Ван Мынг, Нугманов А.М., Фирсова Л.Ю. Кристаллизация  $\text{CaCO}_3$  на поверхности стали при катодной защите. Морские интеллектуальные технологии, 2017, №3 (37), т.2, с.133-140.
3. Чернов Б.Б., Нугманов А.М., Фирсова Л.Ю. Кристаллизация  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  на поверхности стали при катодной защите. Морские интеллектуальные технологии, 2017, №3 (37), т.2, с.127-132.
4. Чернов Б.Б., Пустовских Т.Б. Кинетика образования минеральных осадков из морской воды на катодно поляризуемой металлической поверхности. Защита металлов, 1989, т.25. с.506-512.

**References**

1. Chernov B.B., Chaves I.A., Nugmanov A.M., Melchers R.E.. Comparative Marine Immersion Corrosion of Ship Construction Steels Exposed in Arctic and Temperate Waters. Corrosion & Prevention 2017. Paper 51. p.p.1-10. Newcastle (Australia).
2. Chernov B.B., Vu Van Mung, Nugmanov A.M., Firsova L.Yu. Crystallization  $\text{CaCO}_3$  on a surface of steel at cathodic protection. Sea intellectual technologies, 2017, №3 (37), part 2, p.p. 133-140.
3. Chernov B.B., Nugmanov A.M., Firsova L.Yu. Crystallization  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  on a surface of steel at cathodic protection. Sea intellectual technologies, 2017, №3 (37), part 2, p.p. 127-132.
4. Chernov B.B., Pustovskikh T.B. Kinetics of formation of mineral deposits from sea water on a cathodic polarizable metal surface. Protection of metals, 1989, V.25, p.p. 506-512.

УДК 681.51

## **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ СУДНА НА ОСНОВЕ СТЕПЕННЫХ РЯДОВ**

**Александр Александрович Дыда**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Автоматических и информационных систем  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел. +7 (924) 242-84-20, e-мэйл: adyda@mail.ru

**Елена Борисовна Осокина**

кандидат технических наук  
доцент кафедры Электронной и микропроцессорной техники  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
e-мэйл: osokina@msun.ru

**Елена Павловна Чинчукова**

старший преподаватель кафедры Теоретической механики  
и сопротивления материалов  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел. +7 (914) 708-41-29, e-mail: chinchukova\_lena@mail.ru

### **Аннотация**

Основой для построения систем управления движением судна является выбранная математическая модель. Известны различные линейные и нелинейные модели, описывающие, в частности, движение судна по курсу. Применение линейных моделей, обусловлено простотой их практического использования, однако, в ряде случаев могут потребоваться более адекватные нелинейные модели. В настоящей работе для представления нелинейностей, учитывающих моменты сил вязкого сопротивления, которые действуют на судно, предложено использование степенных рядов. Суть работы состоит в получении алгоритмов настройки коэффициентов степенного ряда, представляющего нелинейность в модели судна. Теоретической основой исследования является метод скоростного градиента. Приведены примеры, иллюстрирующие применение разработанного подхода для четырех вариантов математических моделей судна. Результаты моделирования подтверждают работоспособность алгоритмов идентификации, основанных на степенных рядах.

**Ключевые слова:** управление судном, линейные и нелинейные модели судна, степенные ряды, параметрическая идентификация, метод скоростного градиента, алгоритмы адаптации, численный эксперимент

## **SHIP MODEL PARAMETER IDENTIFICATION BASED ON POWER SERIES**

**Alexander A. Dyda**

Professor, Dr. Sci. Tech.

Professor of department of Automatic and information systems  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel. +7 (924) 242-84-20, e-mail: adyda@mail.ru

**Elena B. Osokina**

Cand. Sci. Tech.

Associate professor of the Electronic and microprocessor technics department  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
e-mail: osokina@msun.ru

**Elena P. Chinchukova**

Senior lecturer of the Theoretical mechanics and strength of materials department  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel. +7 (914) 708-41-29, e-mail: chinchukova\_lena@mail.ru

### **Abstract**

The base for ship control system design is a mathematical model. Different linear and nonlinear model that describe, In particular, ship course movement are known. Linear models application are explainer by a simplicity of their practical usage. However, nonlinear models are more adequate to present a ship dynamics. In this paper, to describe a nonlinearity that presents viscous friction forces



moments are used power series. Main idea consist in derivation of algorithm to adjust coefficients of power series to describe nonlinearity of ship model. Theoretical base of research is a method of speed gradient. To illustrate an approach, examples with four linear and nonlinear ship models are given.

**Key words:** ship control, linear model, nonlinear model, parameter identification, speed gradient method, adaptation algorithms, power series, numerical simulation

**Введение**

Настоящая работа посвящена проблемам идентификации параметров нелинейного объекта, в частности – судна. Решение этой задачи имеет важное значение при построении систем управления судном или других морских подвижных объектов (МПО). Общая математическая модель движения судна представляет собой набор дифференциальных уравнений высокого порядка, для частных задач, например, для задач управления курсом судна используется упрощенные линейные и нелинейные [1, 2, 3, 4].

Линейные модели представляют собой существенно упрощенные модели. Более адекватными и близкими к реальной модели судна являются нелинейные модели. В настоящей статье решается задача определения параметров нелинейной модели судна. Основная идея заключается в разложении неизвестной функции, описывающей момент силы вязкого сопротивления, в степенной ряд и тем самым сведении задачи определения функции к задаче определения коэффициентов, т.е. к параметрической идентификации.

Рассмотрим модель судна, как нелинейную модель судна первого порядка [1, 5] со следующей структурной схемой (Рис. 1).

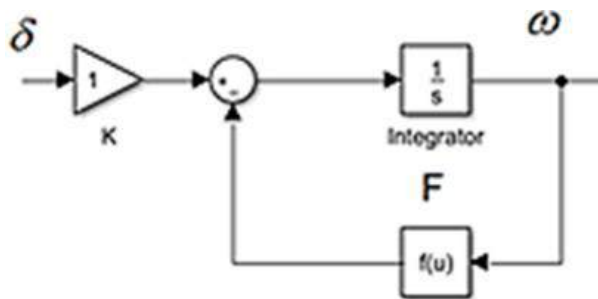


Рисунок 1. Структурная схема нелинейной модели судна первого-порядка, где F - нелинейная функция

Упрощенная математическую модель динамики судна можно представить в общем виде:

$$\dot{\omega} = F(\omega) + B\delta, (1)$$

где B – константа,  $\delta$  – угол поворота пера руля,  $F(\omega)$ - нелинейная функция с неизвестными параметрами и структурой, описывающая влияние вязкого сопротивления на курс судна,  $\omega$  – угловая скорость судна (скорость рысканья).

**1. Алгоритм идентификации параметров судна**

Для решения задач идентификации воспользуемся, так называемой, настраиваемой

моделью, структура которой аналогична модели идентифицируемого объекта:

$$\dot{\omega}_m = F_m(\omega) + B_m\delta + V, (2)$$

где  $\omega_m$  выход модели,  $F_m(\omega), B_m$  - функция и параметр модели,  $V$  – вспомогательная функция повышающая качество управления,  $V = \gamma \text{sign}e$ , где  $\gamma$  - константа,  $e = \omega - \omega_m$  – разница между выходными сигналами управляемого объекта и его настраиваемой модели.

Представим функцию  $f(\omega)$  в виде степенного ряда:

$$F(\omega) = \sum_1^n A_i \omega^i, (3)$$

где n – число учитываемых членов ряда.

Аналогичным образом представим функцию  $F_m(\omega)$  настраиваемой модели :

$$F_m(\omega) = \sum_1^n A_{mi} \omega^i. (4)$$

Для идентификации воспользуемся методом скоростного градиента [4, 6, 7]. Выберем целевую функцию Q вида:

$$Q = \frac{1}{2} e^2. (5)$$

Для определения закона настройки идентифицируемых параметров  $A_{mi}$  и  $B_m$  вычислим производную по времени целевой функции Q с учетом уравнений 1 и 2.

Следуя схеме метода скоростного градиента, определим законы настройки параметров настраиваемой модели:

$$\dot{A}_{mi} = -\gamma e \omega^i, \dot{B}_m = -\gamma e \delta, (6)$$

где  $\gamma$  - константа, определяющая скорость настройки.

**2. Моделирование параметрической идентификации**

Проверка работоспособности, полученного алгоритма параметрической идентификации нелинейной модели судна выполнялась в среде Matlab Simulink, которая показана на схеме (Рис. 2).

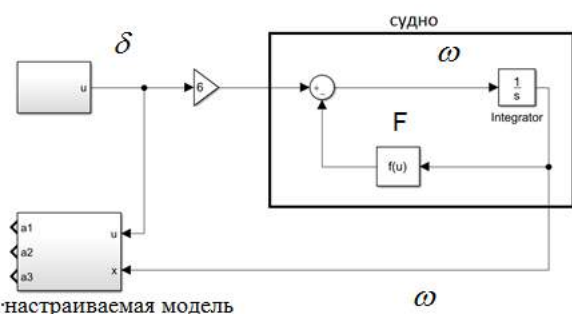


Рис. 2. Simulink-модель системы параметрической идентификации

В соответствии с рекомендациями для выполнения адаптивной идентификации, входной сигнал исследуемого объекта должен иметь достаточно богатый спектр [8], для этого на вход идентифицируемого объекта и настраиваемой модели подается сигнал, представляющий собой комбинацию трех гармоник и сигнала типа меандр.

При выполнении численного эксперимента для моделирования функции  $F(\omega)$ , описывающей влияние вязкого сопротивления среды на судно, выбирались полиномы первого и третьего порядка (нечетносимметричная функция).

$$F(\omega) = A_3\omega^3 + A_2\omega^2 + A_1\omega + A_0 \quad (7)$$

В настраиваемой модели принято, что  $F_m(\omega)$  является так же полиномом третьего порядка, коэффициенты которой в результате настройки идентифицируют параметры нелинейной модели судна. Рассмотрим последовательно различные варианты:

Для определенности зададимся конкретными значениями параметров (коэффициентами) модели судна.

Вариант 1. Рассмотрим функцию  $F(\omega)$  в виде ряда

$$F(\omega) = A_1\omega \quad (8)$$

В этом случае исходная нелинейная модель судна сводится к простой линейной модели первого порядка. Тогда настраиваемыми параметрами являются  $A_1$  и  $B_m$ .

На графиках (Рис. 3) показан процесс идентификации параметров при  $A_1=2$ ,  $A_2=0$ ,  $A_3=0$ ,  $B_m=6$ .

Как видно из результатов численного моделирования, параметры настраиваемой модели стремятся к заданным параметрам модели судна, то есть идентификация успешно выполняется.

Вариант 2. Рассмотрим функцию  $F(\omega)$  в виде ряда

$$F(\omega) = A_3\omega^3 \quad (9)$$

На графиках (Рис. 4) показана настройка коэффициентов  $A_m$ ,  $B_m$ .

Были заданы следующие параметры -  $A_1=0$ ,  $A_2=0$ ,  $A_3=2$ ,  $B_m=6$ .

Очевидно, что для выбранной нелинейной модели идентификация выполняется успешно. Средние составляющие параметров настраиваемой модели стремятся к истинным параметрам идентифицируемого нелинейного объекта.

Вариант 3. Рассмотрим нелинейную модель судна, в которой момент вязкого сопротивления описывается комбинацией линейной и кубической зависимостей

$$F(\omega) = A_1\omega + A_3\omega^3 \quad (10)$$

Зададимся следующими параметрами настраиваемой модели  $A_1=3$ ,  $A_2=0$ ,  $A_3=1$ ,  $B_m=6$ .

Эффективность алгоритма идентификации представлены, подтверждают полученные графики графики.

Вариант 4. Рассмотрим линейную математическую модель динамики судна второго порядка. На практике, кроме простейших моделей первого порядка используются, так же модели более высоких порядков [4, 9]. Покажем применимость разрабатываемого подхода на примере модели динамики судна второго порядка.

Удержание лишь одного члена ряда в функции  $F(\omega)$  приводит к линейной математической модели динамики судна. При выборе математической модели динамики судна в виде дифференциального уравнения второго порядка ее параметры могут быть представлены в вид двух матриц:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B_{12} \\ B_{22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Алгоритм аналогичный (6) так же успешно выполняет идентификацию параметров (12) настраиваемой модели объекта управления

$$\begin{aligned} A_{m11} &\approx A_{11} = -0,4 & A_{m22} &\approx A_{22} = -0,6 \\ A_{m12} &\approx A_{12} = -0,8 & B_{m11} &\approx B_{11} = 0 \\ A_{m21} &\approx A_{21} = -0,2 & B_{m21} &\approx B_{21} = 1 \end{aligned} \quad (12)$$

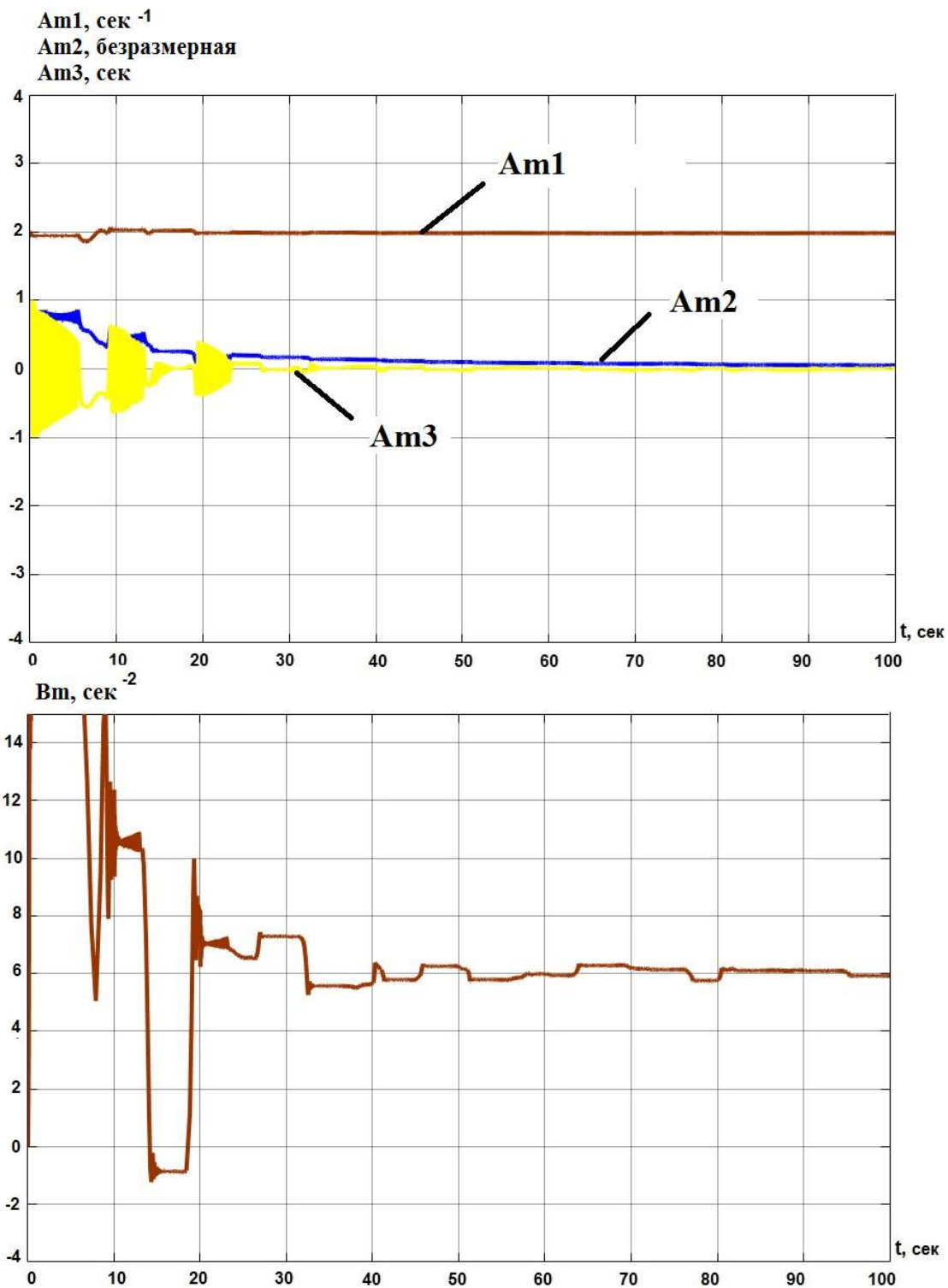


Рис. 3.  $A_m$  и  $V_m$  линейной модели первого порядка

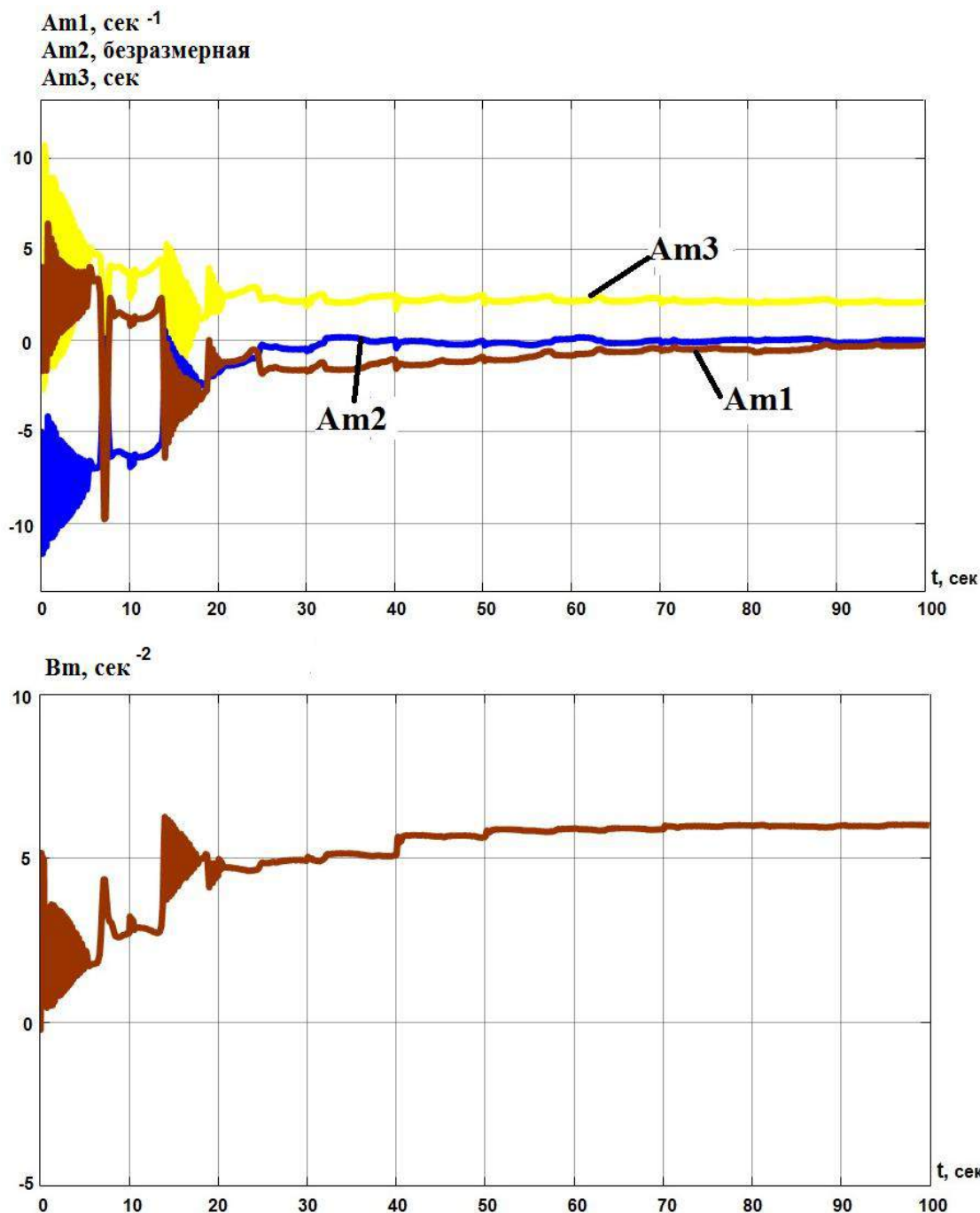


Рис. 4. Am и Vm настраиваемой модели Вариант 2

**Заключение**

Предложенный подход позволяет аппроксимировать степенными рядами, содержащиеся в математической модели динамики судна, априорно неизвестные функции, в частности, соответствующие моментам сил вязкого сопротивления. При этом проблема функциональной неопределенности, характерная динамике судна, сводится к задаче параметрической идентификации коэффициентов выбранного степенного ряда.

Таким образом, проведенные на основе математической модели судна исследования показали возможность и перспективность применения степенных рядов для решения задач идентификации параметров нелинейных динамических объектов.

Дальнейшие исследования в этом направлении могут быть проведены с использованием более сложных нелинейных математических моделей, содержащих функции нескольких переменных.

**Литература**

1. Amerongen J. Adaptive Steering of Ship: PhD thesis/J. van Amerongen. -Delft University of Technology, 2005. - 156 p.
2. Nomoto K. and Norrbjn N. A review of methods of defining and measuring the manoeuvrability of ships. ITTC, Manoeuvrability Committee Report, 1969.
3. Nomoto K., Taguchi T. and Hirano S. On the steering qualities of ship. International Shipbuilding Progress, v.4, N 35, p.56-64, 1957.
4. Дыда А.А., Дыда П.А., Осокина Е.Б., Оськин Д.А., Адаптивная идентификация параметров моделей судов на основе алгоритма скоростного градиента, Морские интеллектуальные технологии. 2016. Т. 1. № 3 (33). с. 263-268.
5. Андриевский Б.Р., Фрадков А. Л. Избранные главы теории автоматического управления : СПб : Наука, 2000. 475 с.
6. Дыда А.А., Адаптивное и нейросетевое управления сложными динамическими объектами : Владивосток : Дальнаука, 2006. 149 с.
7. Дыда А.А., Чинчукова Е.П., Шевченко М.В., Применение степенных рядов для построения адаптивной системы управления курсом судна, Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2011. № 1. с. 121-124.
8. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат.лит., 1990. – 296 с. – ISBN 5-02-014105-4.
9. Осокина Е.Б. Параметрическая идентификация системы управления судном на основе модели Номото2-го порядка // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. Вып.2. С. 120-123.

**References**

1. Amerongen J. van Adaptive Steering of Ship: PhD thesis of Job van Amerongen.,Delft University of Technology, 2005., p.156.
2. Nomoto K. and Norrbjn N. A review of methods of defining and measuring the manoeuvrability of ships. ITTC, Manoeuvrability Committee Report, 1969.
3. Nomoto K., Taguchi T. and Hirano S. On the steering qualities of ship. International Shipbuilding Progress, v.4, N 35, p.56-64, 1957.
4. Dyda A.A., Dyda P.F., Osokina E.B., Oskin D.A. An adaptive identification of ship model parameters based on speed gradient algorithm. Marine intelligent technologies, 2016, v. 1. № 3 (33). pp 263-268
5. Andrievskij B.R., Fradkov A.I., Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravleniya. SPB Nauka, 2000, p-475
6. Dyda A.A., Adaptivnoe I nejrosetevoe upravleniya slozhnymi dinamicheskimi obektami. Vladivostok, Dalnauka, 2006, p-149
7. Dyda A.A., Chinchukova E.P., Shevchenko M.V., Primenenie stepennyh ryadov dlya postroeniya adaptivnoj sistemy upravleniya kursom sudna., Nauchnye problem transporta sibiri I dalnego vostoka., 2011 №1, pp-121-124
8. Fradkov A.L., Adaptivnoe upravlenie v slozhnyh sistemah: bespoiskovyje metody.,M.: Nauka., 1990. P. 296.
9. Osokina E.B. Parametricheskaja identifikacija sistemy upravlenija sudnom na osnove modeli Nomoto2-go porjadka // Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2015. Vyp.2. S. 120-123.

УДК 629.5(051.8+052.3+058(54+68+74))

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВОЖДЕНИЯ

**Виктор Валентинович Завьялов**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Технические средства судовождения  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел. +7 (912) 505 22-02; e-mail: zavyalov@msun.ru

**Александр Иванович Саранчин**

доцент  
доцент кафедры Технические средства судовождения  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
e-mail: saranchin@msun.ru

**Мария Александровна Фарафонова**

аспирант кафедры Технические средства судовождения  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел. +7 (914) 963-42-17, e-mail: marfaralx@yandex.ru

### Аннотация

В работе рассматриваются вопросы, связанные с повышением безопасности судоходства в сложных условиях (плавание в узкостях, при швартовых операциях и т.п.). Производится анализ литературных источников по вопросам определения и контролирования параметров движения судна, влияния «человеческого элемента», статистических данных по авариям судов. Анализируются типовые ошибки судоводителей при швартовых операциях, а также погрешности судовой навигационной аппаратуры (РЛС, ЭКНИС, NAVSTAR GPS и ГЛОНАСС). Рассмотрены недостатки береговой системы лазерной швартовки судов. Предложена судовая система лазерной швартовки (Патент РФ №2613465), состоящая из двух идентичных лазерных дальномеров со встроенными акселерометрами, блока обработки информации, дисплея. Рассмотрен принцип работы. Приведены результаты экспериментальной проверки функционирования основной части системы (лазерного дальномера) при швартовке судна. Показаны перспективы повышения безопасности мореплавания в сложных навигационных условиях путём внедрения лазерных дальномерных устройств в штатное оборудование ходового мостика.

**Ключевые слова:** человеческий фактор, лазерные дальномеры, швартовка, судно, причал, авария, стесненные условия, ЭКНИС, нос-корма, кратчайшее расстояние

## PROSPECTS OF USING AUTONOMOUS LASER SYSTEMS TO ENSURE THE SAFETY OF NAVIGATION

**Viktor V. Zavyalov**

professor, Dr.Sci.Tech.,  
Professor of Department of Technical Aids to Navigation  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel. +7 (912) 505 22-02, e-mail: zavyalov@msun.ru

**Alexandr I. Saranchin**

associate professor  
associate professor of Department of Technical Aids to Navigation  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
e-mail: saranchin@mail.ru

**Mariya A. Farafonova**

Post graduate of Department of Technical Aids to Navigation  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel. +7 (914) 963-42-17, e-mail: [marfaralx@yandex.ru](mailto:marfaralx@yandex.ru)

### Abstract

The paper deals with the issues related to improving the safety of navigation in high risk areas (navigation in narrow spaces, in mooring operations, etc.). The analysis of literary sources on the definition and control of the parameters of the ship's movement, the influence of the "human element", statistical data on ship accidents. Typical errors of navigators during mooring operations, as well as errors of ship navigation equipment (radar, ECDIS, NAVSTAR GPS and GLONASS) are analyzed. The disadvantages of the shore system of laser mooring of ships are considered. The proposed marine



system of laser mooring (RF Patent No. 2613465), consisting of two identical laser rangefinders with built-in accelerometers, information processing unit, display. The principle of work is considered. The results of experimental verification of the functioning of the main part of the system (laser rangefinder) when mooring the vessel are presented. The prospects of improving the safety in difficult navigation conditions through the introduction of laser rangefinder devices in the standard equipment of the navigation bridge are shown.

**Key words:** human factor, laser range finders, mooring, vessel, berth, accident, cramped conditions, ECDIS, fore and aft, the shortest distance

### Введение

В настоящее время разработчики и производители, совершенствуя судовое навигационное оборудование – одно из средств в общем комплексе мероприятий по обеспечению безопасности мореплавания – снижают влияние «человеческого элемента» на аварийность морского флота. Но швартовные операции были и остаются одними из сложнейших и технически уязвимых этапов эксплуатации судна.

По проблемам определения, контролирования параметров движения судна, повышения точности их определения и выработки управляющих воздействий при плавании в районах со стесненными условиями, при входе в порт и выходе из него, при швартовных операциях опубликовано ряд работ [1–4].

Львиная доля влияния «человеческого элемента» не позволяет должным образом снизить аварийность судов в портовых водах. Ошибки допускают все люди без исключения, будь то опытный капитан, лоцман или же вахтенный помощник. Передача информации о параметрах движения судна через несколько субъектов к капитану ведёт к суммированию погрешностей каждого звена, и на выходе получается искажённая информация.

Подтверждением серьёзности положения в мировом судоходстве являются статистические данные Европейского агентства по безопасности на море (European Maritime Safety Agency). Согласно отчёта 2017 года [5], по месту происшествий морских аварий на грузовом флоте 45% занимают портовые воды, 22% прибрежные воды.

В отчёте также показано, что контакты судна со стационарными объектами, включающие в себя и навалы судов на причалы, из общего количества аварий составляют 20% и устойчиво занимают второе место.

Распределение аварий по типам судов: сухогрузным судам принадлежит 33% из общего количества аварий, 17% – контейнерным и 16% за балкерами.

Это лишний раз подтверждает необходимость использования дополнительных систем позиционирования судна относительно объекта швартовки.

### 1. Постановка задачи

В качестве примера можно рассмотреть один из наиболее распространённых способов оценки расстояния до причала либо иного объекта швартовки.

При подходе к причалу капитан руководит швартовной операцией совместно с лоцманом, вахтенные помощники находятся на носовой и кормовой оконечностях судна. По мере приближения судна к причалу, вахтенные докладывают дистанцию до причала, капитан с лоцманом, руководствуясь этой информацией, оценивают скорость сближения и

необходимость принятия решений по маневрированию. При данном способе возможны следующие ошибки:

ошибка глазомерной оценки расстояния, вызванная неопытностью молодых вахтенных помощников, усталостью, погодными условиями, условиями видимости и т.п.;

искажения при передаче информации посредством УКВ радиостанций, вызванные помехами связи;

ошибка в оценке полученной информации капитаном, погрешности в расчёте скорости сближения, а как следствие, последующая ошибка во времени принятия манёвра и его интенсивности;

ошибка лоцмана в передаче команд буксирам. Порой в некоторых портах общение лоцмана с буксирами производится на национальном языке, и капитан не может контролировать правильность данных команд.

Исходя из вышесказанного, можно сказать, что данный способ в значительной мере зависит от «человеческого элемента».

Также оценку расстояния до причала можно проводить с использованием радара. Современные радары позволяют судоводителю производить точное расхождение с судами и навигационными опасностями в море, а автоматические средства радиолокационной прокладки значительно снижают влияние «человеческого элемента» в оценке расхождения между судами. Точность радаров в море достаточно велика, но вот в портовых водах её, как правило, недостаточно. Такие параметры как: импульсная и средняя мощность, длина волн излучения, длительность излучаемого импульса, минимальная дальность действия и мертвая зона, разрешающая способность РЛС по углу и по дальности, погрешности определения координат целей, максимальная дальности действия – всё это влияет на погрешность измерений по отдельности и суммарно. Зачастую, развитая береговая инфраструктура порта вызывает на экране радиолокатора засветку в результате многократного переотражения сигнала. На причалах по перегрузке, либо расположенными вблизи устройств хранения опасных грузов местные власти в целях безопасности просят выключать излучение антенны РЛС. Соответственно использовать данный способ также не всегда имеется возможность.

Наиболее распространённый на сегодняшний день способ ориентации судна относительно причала, либо иного объекта швартовки – использование электронной картографии (карты, по возможности, самого крупного масштаба). Анализ возможных погрешностей данного способа показывает:

Погрешности картографии. До изобретения электронной картографии все навигационные карты были лишь в бумажном варианте. Развитие

электронных технологий требует цифрового представления информации бумажных карт. Цифрование карты и средств ее отображения несёт в себе свои погрешности. Нельзя создать электронную карту по бумажной с повышенной точностью без дополнительных данных и промеров. Разрешающая способность оригинального масштаба строго определяет эту точность. При подходе необходимо использовать максимально крупный возможный масштаб карты, но при этом не все штурмана понимают, что при представлении электронной карты в максимально крупном масштабе, погрешности не уменьшаются.

Все судоводители должны принимать во внимание, что в стесненных водах точность данных карты может быть меньше, чем основной системы определения места судна (точность DGPS 1-5 м). Гидрографические съемки, проводившиеся с использованием высокоточных береговых РНС вплоть до 1980 г. обеспечивали в среднем точность 20 м ( $P=0,95$ ). В настоящее время требования к точности обычных геодезических съемок местности составляют  $\pm 13$  м, а для специальных съемок –  $\pm 5$  м. В обоих случаях имеется в виду 95% погрешность определения положения.

Вывод: несмотря на то, что требуемая точность определения места судна в стесненных водах  $\pm 10$  м, точность положения картографических объектов на большинстве навигационных карт ниже.

Разрешающая способность дисплеев. На современных системах электронной картографии дисплеи, отображающие электронные карты, имеют разрешающую способность порядка 0,2-0,3 мм. По этим данным мы можем установить предельную точность масштаба карты. Возьмем для примера частный масштаб навигационной карты для обеспечения навигационной безопасности плавания при входе судна в порты, гавани, бухты, на якорные места, рейды и т.д. – 1:10000. Для данного масштаба карты при размере пиксела 0,3 мм предельная точность составляет 3 м. Эта точность уже хуже, чем точность определения места по DGPS и требуемая точность определения положения в стесненных водах.

Одной из самых динамичных погрешностей является погрешность GPS (Global Positioning System) – система глобального позиционирования). Электронная картография, в том виде, в котором она используется на морских судах на сегодняшний день, представляет собой сложную, интегрированную систему. Все переменные данные по судну и окружающей его обстановке она получает от других судовых систем таких как: гирокомпас, лаг, GPS, радар, АИС и т.п.

Что касается координат судна, их система получает при помощи GPS. Соответственно, все имеющиеся погрешности данной системы автоматически переходят в погрешности электронной картографии.

Эти погрешности зависят от многих факторов: ионосферная и тропосферная рефракция, многолучевое распространение (принятие спутником не только прямого сигнала, но и сигналов, отраженных от зданий, крутых и обрывистых берегов, скал и т.п.), возможные сбои в электронных системах спутников, геометрия спутников (в идеале для наименьшей погрешности требуется 4 спутника, в

портовых водах, высокие строения могут затруднять приём сигналов со спутников, оставшаяся конфигурация спутников в зоне видимости будет определять погрешность обсерваций, но уменьшение их количества всегда ведёт к ухудшению точности определения места судна), так же наличие высоковольтных линий передач в портовых водах может значительно исказить сигнал спутника, принимаемый судовой аппаратурой, что ведёт к увеличению погрешности. Нельзя так же не упомянуть о том, что работоспособность и правильное функционирование системы NAVSTAR GPS контролирует Правительство США, и не все современные суда имеют на борту альтернативную независимую спутниковую систему (ГЛОНАСС). Следовательно, любой военный конфликт, либо иная ситуация обострения отношений между странами, может повлечь за собой сбой и прекращение работы системы NAVSTAR GPS.

Обобщая вышесказанное, можно сделать выводы: максимальная точность определения координат GPS приемниками в горизонтальной плоскости составляет примерно 1-2 метра (при условии минимальных погрешностей), но точность эта достаточно сильно переменчива, зависит от многих факторов, не зависящих от судоводителя, и может варьироваться от 1 до 100 м и более.

Из отмеченных недостатков следует, что, несмотря на значительный технический прогресс, процесс швартовки судна остается слабо оснащенным технически и до сих пор обеспечивается, в основном, мастерством и интуицией капитана. Это объясняется тем, что судовая аппаратура в первую очередь исторически создавалась для использования в открытом море. В наше время, когда тоннаж судов и, следовательно, их инерционность достигают гигантских величин, погрешности всех имеющихся систем являются основным их недостатком, так как порой точность не достаточна для определения параметров сближения судна с объектом швартовки и своевременного принятия мер по управлению судном.

В борьбе с данными проблемами на сегодня известна и широко используется система лазерной швартовки судов (BAS – Berthing Aid System) для обеспечения безопасности швартовочных операций. Это достаточно дорогостоящая система, поэтому ей обычно оборудуются нефтяные и газовые терминалы. Она значительным образом повышает качество, точность и безопасность швартовки судов.

В России, к примеру, подобная система лазерной швартовки крупнотоннажных судов (ЛСШКС) внедрена в 2002 году в п. Новороссийск на причалы нефтерайона «Шесхарис» [6]. Согласно требованиям Технического регламента № 620 от 12.08.2010 «О безопасности объектов морского транспорта», и технико-эксплуатационных требований, утвержденных Министерством транспорта РФ, под оборудование такими системами попадает около 700 причальных терминалов на территории РФ.

Система лазерной швартовки судов, предназначена для гарантированного повышения безопасности швартовочных операций и исключения риска навала судна на причал, путем лазерного измерения расстояния, скорости и угла расположения судна в критическом диапазоне от 200 до 0 м линии швартовки.

Основой измерительной Системы лазерной швартовки являются два лазерных датчика, которые устанавливаются на причале. В систему также входит контроллер и центральный компьютер с несколькими опциями вывода данных. От них производится передача информации о сближении судна с причалом в режиме реального времени работникам порта и судоводителю на соответствующий дисплей или портативный монитор, а также на причальное информационное табло, что позволяет корректировать движение судна и безопасно осуществить швартовку судна к причалу.

Так же для передачи информации на судно об его положении и движении используются установленные на причале мониторы значительных размеров, с таким расчетом, чтобы информация была визуально видна от границы начала маневрирования по выполнению швартовки. Система рассчитана на работу в достаточно сложных погодных условиях. Однако во многих портах РФ, особенно в северных и дальневосточных морях, в зимнее время вследствие сильного снегопада возможно налипание снега на экран табло, что ухудшает прием информации на судне.

Для исключения этого недостатка в системе предусмотрено дублирование передачи информации по радиосвязи [7]. Однако здесь в силу вступает человеческий фактор, то есть, возможны ошибки и неточности, могущие привести к аварийной ситуации. Следовательно, неполное исключение негативного влияния «человеческого элемента» также является недостатком данной системы.

В портовых водах, как уже было сказано выше, погрешности существующих судовых навигационных систем возрастают [8], поэтому в этом случае BAS значительно превышает их в точности и повышении безопасности швартовых операций.

Как было сказано раньше, береговой лазерной системой швартовки в основном оборудуются нефтеналивные и газовые терминалы. Один из основных и самых весомых недостатков береговой лазерной системы швартовки – это локальная и стационарная система. Соответственно инфраструктура причалов, предназначенных для швартовки судов, аварийность которых значительным образом превышает аварийность танкерного флота, так и остаётся уязвимой к навалам судов, вследствие ошибок при швартовке [9].

## 2. Автономная судовая лазерная система швартовки

Для повышения безопасности проведения швартовых операций предлагается судовая система лазерной швартовки (Патент №2613465) [10], направленная на устранение недостатков уже имеющихся систем. Данная система устанавливается непосредственно на судне. Это позволит повысить надежность получения информации практически независимо от погодных условий и удешевить всю систему. Система включает в себя два портативных лазерных дальномера, встроенные акселерометры, блок обработки информации, дисплей вывода полученных данных.

Перед началом швартовки лазерные дальномеры устанавливаются, при помощи специального

крепления, к стойке фальшборта на верхней палубе на оконечностях судна, которые в случае непараллельного подхода первыми коснутся причала. Предполагается использование сканирующих лазерных дальномеров. Их принцип работы основан на непрерывном измерении дальности в определенном секторе. Наиболее опасным будет считаться участок причала, до которого получено кратчайшее расстояние в секторе обзора. Это позволит компенсировать возможные погрешности при качке. Интегрирование дальномера с акселерометром позволит корректировать кратчайшее расстояние с учётом угла наклона лазерного луча. Это исключает необходимость ввода дополнительных данных по высоте борта, высоте причала, посадки судна, и учёта приливов-отливов.

Принцип работы судовой системы лазерной швартовки судна, заключается в том, что перед началом швартовой операции на верхней палубе судна в ее носовой и кормовой оконечностях устанавливают по одному лазерному измерителю, снабженному датчиком угла наклона лазерного луча, при этом каждый из данных лазерных измерителей встраивают в крепежное устройство, предварительно установленное непосредственно на фальшборте верхней палубы каждой из оконечностей судна [11–13].

При подходе судна к объекту швартовки наводят лазерный луч каждого лазерного измерителя на выбранную область объекта швартовки и запускают цикл измерения им расстояния до данного объекта, при котором устройством приема-передачи каждого лазерного измерителя излучают лазерные лучи и принимают соответственно отраженные, как показано на схеме (Рис. 1).

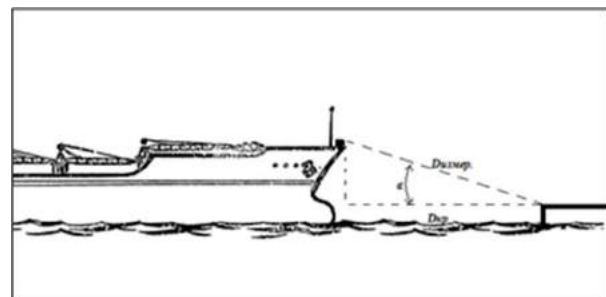


Рис. 1. Измерение кратчайшего расстояния между судном и причалом

Одновременно датчиком угла наклона лазерного луча каждого лазерного измерителя определяется угол наклона лазерного луча к плоскости горизонта, путем излучения и приёма лазерных лучей. Замер угла наклона лазерного луча крайне необходим, т.к. современные суда имеют значительную высоту надводного борта, и замер кратчайшего расстояния между судном и объектом при швартовке будет проводиться с главной палубы, при этом будет иметь место наклон лазерного луча.

Искомое кратчайшее горизонтальное расстояние  $D_{кр}$  получают по формуле:

$$D_{кр} = D_{изм} \cdot \cos \alpha, \quad (1)$$

$D_{изм}$  – расстояние, измеренное с судна, м;  $\alpha$  – угол наклона луча лазера, град.

С кормовой и носовой оконечностей судна информация о полученном расстоянии из устройств приёма-передачи и величине углов наклона лучей поступает в блок обработки информации (БОИ). После вычисления кратчайшего расстояния от носа и кормы до линии причала, вырабатывается скорость сближения оконечностей с причалом и моделируется положение судна относительно причала, которое отображается на дисплее. По соотношению скоростей оконечностей судна вычисляется его угловая скорость и приближенное положение центра вращения, которое также отмечается на дисплее. Вывод информации возможен на специальный отдельный дисплей и/или использование ЭКНИС. В ЭКНИС имеются резервные каналы для подключения различных подсистем, один из которых можно использовать для подключения судовой системы лазерной швартовки. Отдельная вкладка в интерфейсе позволит использовать эту информацию лишь в необходимое время, к примеру, во время швартовочных операций, не загромождая общую информацию основной системы. Возможный пример оформления вкладки показан на изображении (Рис. 2). Желтым цветом обозначено судно, Р – это расположение расчётного полюса поворота, зелёными стрелками указаны значения и направления скорости движения носовой и кормовой оконечности соответственно, коричневым цветом обозначена граница причальной стенки,  $D_n$  и  $D_k$  – кратчайшее расстояние до причала от носовой и кормовой оконечностей соответственно.

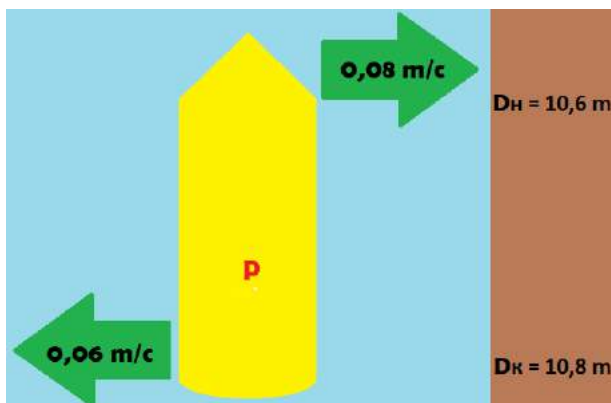


Рис. 2. Возможное оформление информации судовой системы лазерной швартовки на дисплее

Достоинство предложенного способа лазерной швартовки состоит в том, что снижается вероятность аварийных ситуаций у судна, оборудованного такой системой, при швартовках в любом порту, к другим судам, к берегу.

Одним из достоинств судовой системы лазерной швартовки можно отнести её сравнительную

дешевизну. Необходимо только дополнить имеющееся на судне оборудование лазерными измерителями и блоком обработки информации. Моделирование и отображение движения и положения судна может производиться на имеющемся и обязательном на судне оборудовании. Эта задача решается использованием соответствующего программного обеспечения.

### 3. Экспериментальная проверка лазерной системы швартовки

Устройство экспериментальной установки представлены на изображении (Рис. 3).

На судне «Viktor Titov», во время швартовочной операции к судну «Constitution Spirit» 12 мая 2016 года в южнокорейском порту Йосу, был проведён эксперимент с использованием экспериментальной установки по замеру изменения кратчайшего расстояния между судами, угла наклона лазерного луча, скорости сближения.



Рис. 3. Экспериментальная модель лазерного устройства судовой системы лазерной швартовки

Судно «Constitution Spirit», далее «швартуемое судно» было подведено к судну «Viktor Titov», стоящему на якоре, далее объект швартовки, с которого проводился эксперимент, тремя буксирами. Когда суда заняли позиции на параллельных курсах, буксиры начали работать «на упор», тем самым параллельно подводя швартуемое судно к объекту швартовки. В пределах диапазона измерения лазерного дальномера «Bosch GLM 40 Professional» равного  $\approx 40$  м, начали цикл измерения с промежутком 15 секунд дистанции между судами ( $D_{изм}$ ) в метрах и угла наклона лазерного луча ( $\alpha$ ) в градусах. По формулам (1) и

$$V = \frac{\Delta D_{кр} \cdot 100}{\Delta t}, \tag{2}$$

находим кратчайшее расстояние между судами ( $D_{кр}$ ), и скорость их сближения ( $V$ ).

Графики Зависимости изменения кратчайшего расстояния между судами от времени и скорости сближения швартуемого судна с объектом швартовки представлены на графиках (Рис. 4 и 5).



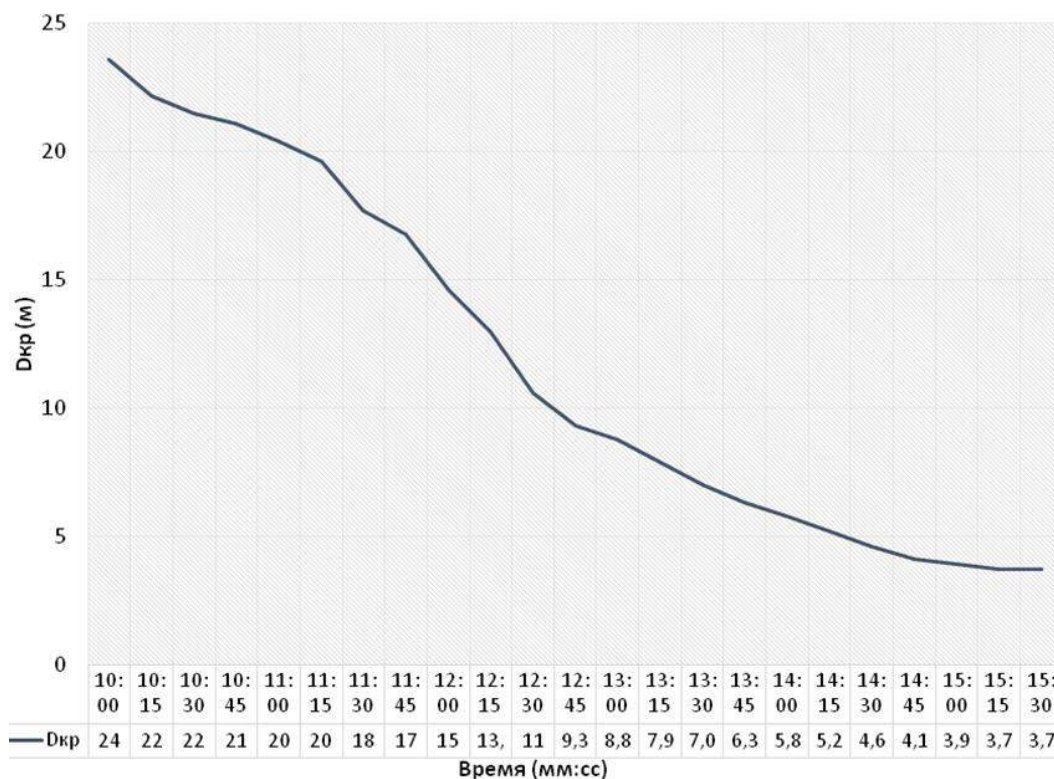


Рис. 4. Зависимость изменения расстояния до причала от времени

**Заключение**

Анализ графиков показывает, что швартовка судна «Constitution Spirit» к судну «Viktor Titov» (Рис. 6) происходила плавно, т.к. на заключительном этапе швартовки ( $D_{кр} < 10$  м) не было нарушений по скорости сближения, и равных для судов 100 тыс. т – не более 8 см/с.

Остаточная инерция была погашена при соприкосновении судна «Constitution Spirit» с кранцевой защитой, которая была заранее вооружена на «Viktor Titov».

Основным выводом данного эксперимента можно считать то, что замер параметров сближения

объектов при швартовке лазерным дальномерным устройством судовой системы лазерной швартовки судов не уступает подобным замерам параметров сближения объектов при швартовке береговой системой лазерной швартовки. Однако надо учитывать то, что береговая система имеет локальное применение.

Судовая система превосходит береговую в том, что она может использоваться во всех необходимых ситуациях, когда присутствует риск повреждения судна при навале.



Рис. 5. График зависимости скорости сближения судов от времени

Авторами показана возможность и целесообразность практического применения автономной судовой лазерной системы швартовки на водном транспорте, как средства повышения безопасности мореплавания.

Предложенная система и другие современные лазерные системы [14] могут использоваться и при обеспечении безопасности плавания в узкостях, на сложных фарватерах, а также в качестве дополнительного источника информации на судах с динамическим позиционированием.



(а)



(б)

Рис. 6. Швартовка судна «Constitution Spirit» к судну «Viktor Titov»

Возможность использования лазерных систем станет новой составной частью интегрированного

мостика, а значит новой ступенью системы e-Navigation.

#### Литература

1. Давыдов В.С. Пути повышения эффективности обеспечения безопасности плавания крупнотоннажных судов в сложных навигационных условиях / Давыдов В.С., Богомья В.И., Кожухаренко Р.В., Демичев В.В. // Водный транспорт. Киевская ГАВТ им. гетмана Петра Конашевича-Сагайдачного. Киев. № 1(19), 2014. – С. 66–70.
2. Мельник, П.В. Некоторые модели швартовых операций безэкипажных судов в концепции e-Навигации / Транспортное дело России. М.: № 4(37), 2017. –С. 109-111.
3. Кораблев, В.Г. Проверка достоверности определения координат движущегося судна с помощью двух разнесенных приемников GPS / В.Г. Кораблев, С.В. Пашенцев, Ю.И. Юдин // Вестник МГТУ, том 12, №2, 2009. – С. 250-254.
4. Комаровский, Ю.А. Повышение точности определения скорости в спутниковых системах швартовки судов / Ю.А. Комаровский // Вестник инженерной школы ДВФУ. Владивосток. № 2(31), 2017. – С. 30–43.
5. The Annual Overview of Marine Casualties and Incidents consists in a high-level analysis of accidents reported by the EU Member States in European Marine Casualty Information Platform (EMCIP) - URL: <http://emsa.europa.eu/> – (27.02.2018)
6. Росторгуева Н.Ю. Анализ и количественные оценки статистической базы параметров швартовки лазерной системы дальнометрии // Сборник научных трудов, выпуск 12.– Новороссийск: МГА имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2007. – С. 100-104.
7. Ерыгин В.В. Радиозлектронные средства обеспечения безопасности швартовки крупнотоннажных судов в задаче снижения роли человеческого фактора (канд. дисс.). Новороссийск, РИО МГА, 2005. 156 с.
8. Глобальная спутниковая радионавигационная система /Под ред. В.Н. Харисова, А.И. Петрова, В.А. Болдина. - Изд. 2.- М.: ИПРЖР, 1999. - 560 с.
9. Оганов А.М., Цурбан А.И. Швартовые операции морских судов. М. Транспорт, 1987. 176 с.
10. Патент 2613465. Способ использования лазерной швартовки судна / Фарафонова М.А., Саранчин А.И. - заявлено 17.11.2015 ; опубл. 16.03.2017-3 с.
11. Фарафонова М.А. Применение лазерных дальномерных устройств для швартовых операций морских судов. Сб. серии Судовождение, 2015. – Владивосток: МГУ им. адм Г.И. Невельского, с.105-111.
12. Савельев В.Г., Кобранов С.М. «Пути исследования и разработки лазерных и оптико-электронных систем для швартовки судов». Материалы XXIV конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов Московской государственной академии водного транспорта, М. - «Альтаир» - МГАВТ, 2000.– с. 20

#### References

1. Davy`dov, V.S. Puti pov`sheniya e`ffektivnosti obespecheniya bezopasnosti plavaniya krupno-tonnazhny`x sudov v slozhny`x navigacionny`x usloviyax / Davy`dov V.S., Bogom`ya V.I., Kozhuxarenko R.V., Demichev V.V. // Vodny`j transport. Kievskaya GAVT im. getmana Petra Konashevicha-Sagajdachnogo. Kiev. № 1(19), 2014. pp. 66–70.
2. Mel`nik, P.V. Nekotory`e modeli shvartovy`x operacij beze`kipazhny`x sudov v koncepcii e-Navigacii / Transportnoe delo Rossii. M.: № 4(37), 2017. pp. 109-111.

3. Korablev, V.G. Proverka dostovernosti opredeleniya koordinat dvizhushhegosya sudna s pomoshh`yu dvux raznesenny`x priemnikov GPS / V.G. Korablev, S.V. Pashencev, Yu.I. Yudin // Vestnik MGTU, tom 12, №2, 2009. pp. 250-254.
4. Komarovskij, Yu.A. Povy`shenie tochnosti opredeleniya skorosti v sputnikov`x sistemax shvartovki sudov / Yu.A. Komarovskij // Vestnik inzhenernoj shkoly` DVFU. Vladivostok. № 2(31), 2017. pp. 30–43.
5. The Annual Overview of Marine Casualties and Incidents consists in a high-level analysis of accidents reported by the EU Member States in European Marine Casualty Information Platform (EMCIP). URL: <http://emsa.europa.eu/> – (27.02.2018)
6. Rostorgueva N.Yu. Analiz i kolichestvenny`e ocenki statisticheskoy bazy` parametrov shvartovki lazernoj sistemy` dal`nometrii // Sbornik nauchny`x trudov, vy`pusk 12.– Novorossiysk: MGA imeni admirala F.F. Ushakova, 2007. pp. 100-104.
7. Ery`gin V.V. Radioe`lektronny`e sredstva obespecheniya bezopasnosti shvartovki krupnotonnazhny`x sudov v zadache snizheniya roli chelovecheskogo faktora (kand. diss.). Novorossiysk, RIO MGA, 2005. 156 p.
8. Global`naya sputnikovaya radionavigacionnaya sistema /Pod red. V.N. Xarisova, A.I. Petrova, V.A. Boldina. Izd. 2. M.: IPRZhR, 1999. 560 p.
9. Oganov A.M., Czurban A.I. Shvartovy`e operacii morskix sudov. M. Transport, 1987. 176 p.
10. Patent 2613465. Sposob ispol`zovaniya lazernoj shvartovki sudna / Farafonova M.A., Saranchin A.I. Zayavleno 17.11.2015 ; opubl. 16.03.2017. 3 p.
11. Farafonova M.A. Primenenie lazerny`x dal`nomerny`x ustrojstv dlya shvartovny`x operacij morskix sudov. Sb. serii Sudovozhdenie, 2015. Vladivostok: MGU im. adm G.I. Nevel`skogo. pp.105-111.
12. Savel`ev V.G., Kobranov S.M. «Puti issledovaniya i razrabotki lazerny`x i optiko-e`lektronny`x sistem dlya shvartovki sudov». Materialy` XXIV konferencii professorsko-prepodavatel`skogo sostava, nauchny`x sotrudnikov i aspirantov Moskovskoj gosudarstvennoj aka-demii vodnogo transporta, M. «Al`tair» MGAVT, 2002. p. 20



УДК 623.98: 534.222: 004.93<sup>1</sup>

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОБЛЕМЫ КЛАССИФИКАЦИИ ЦЕЛЕЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМОЙ ПРИ МОНИТОРИНГЕ МОРСКОЙ ОБСТАНОВКИ

**Валерий Александрович Пятакович**

кандидат технических наук, доцент  
начальник научно-исследовательской лаборатории  
Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. адм. С.О. Макарова  
690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6  
тел. +7(914) 662-70-32, 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  
тел. +7(914) 335-68-75, e-mail: kahunya@gmail.com

**Виктория Феликсовна Рычкова**

начальник управления научно-исследовательской  
и инновационной деятельности  
Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел. + 7(908) 993-88-44, e-mail: rychkova@msun.ru

### Аннотация

В статье приводятся результаты очередного этапа научных исследований авторов по созданию интеллектуальной системы морского мониторинга с привлечением аппарата нечеткой логики и комбинированных нейронных сетей для решения задач обнаружения и классификации морских целей. Авторы анализируют комплекс вопросов, возникающих при моделировании процесса распространения звука в морской среде предполагая, что применение имитационного моделирования информационной ситуации, возникающей в момент обнаружения объекта, и методов нечеткой логики позволит сформировать выборку с необходимым количеством данных для обучения нейронных сетей, используемых в разрабатываемой интеллектуальной системе мониторинга полей различной физической природы в морской среде. Реализация разрабатываемого комплекса вычислительных операций нейронных сетей на многопроцессорных нейроподобных сверхбольших интегральных схемах в виде нейросетевой экспертной системы для распознавания и классификации измеряемых информационных полей морских объектов системой мониторинга морских акваторий, обеспечит возможность решения многофункциональных задач морской науки и оборонного комплекса государства.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование морской обстановки, гидрофизические поля, классификация морских объектов; нечёткая логика, нейронные сети, обучающие алгоритмы нейронных сетей

## PERSPECTIVE METHODS FOR SOLVING THE SCIENTIFIC PROBLEM OF TARGET CLASSIFICATION PERFORMED BY A NEURAL NETWORK EXPERT SYSTEM WHEN MONITORING A MARITIME ENVIRONMENT

**Valeriy A. Pyatakovich**

associate professor, Cand. Sci. Tech.  
Director of the research laboratory  
Pacific Higher Naval School named Admiral S. Makarov  
6, Kamskiy pereulok, 690062, Vladivostok, Russia  
tel. +7(914) 662-70-32, e-mail: pva.877com@mail.ru

**Anna M. Vasilenko**

Cand. Sci. Tech.  
Researcher of the research laboratory  
Pacific Higher Naval School named Admiral S. Makarov  
6, Kamskiy pereulok, 690062, Vladivostok, Russia  
tel. +7(914) 335-68-75, e-mail: kahunya@gmail.com.

**Victoria F. Rychkova**

Director of the department of Research and innovation activities  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel. + 7(908) 993-88-44, e-mail: rychkova@msun.ru

### Abstract

This paper contains the results of the next stage of the authors' scientific research on the development of an intelligent marine monitoring system, involving the use of fuzzy logic and combined neural networks to detect and classify marine targets. The authors analyze a set of problems that arise while modeling the process of sound propagation in the marine environment, assuming that the simulation modeling of the information situation arising at the moment of object detection as well as the use of fuzzy logic methods will allow to generate a sample with the amount of data sufficient for the training of the neural networks used in the intelligent system that is being developed to monitor the fields of diverse physical origin in a marine environment. The practical implementation of the system that is developed for executing the computing operations by way of neural network on the multiprocessor neural VLSI circuits in the form of neural network expert system for the identification and classification of measured information fields of sea objects as part of sea waters' monitoring system will provide the ability to solve multi-functional problems of marine science and of the defense industry of the State.

**Key words:** simulation of a maritime environment, hydro-physic fields, classification of marine objects, fuzzy logic, neural networks, neural network training algorithms

### Введение

Решение задач классификации морских объектов на предельных дальностях, несмотря на продолжительные исследования в этой области, по-прежнему остаются актуальными [2, 7, 9, 11].

Причина в том, что традиционные системы распознавания неспособны эффективно использовать ресурсы, предоставляемые новыми технологиями, так как они разрабатывались при помощи инструментария предыдущего поколения.

В упрощенном виде процесс нейрораспознавания (нейроклассификации) можно представить следующим образом: сигнал от шумящего объекта воспринимается гидроакустической антенной, усиливается и поступает на устройство первичной обработки информации, в котором производится подготовка данных для проведения классификации.

Окончательное распознавание (классификацию) можно произвести, используя различные представления сигналов.

Мы полагаем, что применение имитационного моделирования информационной ситуации, возникающей в момент обнаружения объекта, и методов нечеткой логики позволит сформировать выборку с необходимым количеством данных для обучения нейронных сетей системы мониторинга полей различной физической природы в морской среде.

Подчеркнем: эффективность процесса обучения и способность сетей решать поставленные перед ними проблемы во время эксплуатации, например, классифицировать источники физических полей при мониторинге акваторий, целиком зависит от сформированных обучающих выборок.

### 1. Материал исследования

Существует множество терминов, определяющих понятие «искусственная нейронная сеть» (ИНС). Приведем некоторые из них: нейронные сети, нервные сети, нейроподобные сети, нейристорные сети (nerve networks, rescan de nerfs, nerven netze) и т.д. Под нейроподобной сетью в данной работе понимается совокупность искусственных нейронов, связанных между собой с целью передачи и преобразования информации (см. работы Д.Д. Хопфилда, Р.Е. Каллана, Г.А. Карпентура, Т.К. Кохонена, Д.Ф. Люгера и др. [5, 10]).

Нейроподобную сетевую конструкцию можно рассматривать и как способ параллельной обработки данных при классификации образов технических источников информационных полей в морской среде.

Способ, широкое применение которого предсказывали классики кибернетики (У. Рос Эшби, Н. Винер, С. Каморан и др.), наконец занял свое место, получил интенсивное аналитическое и техническое развитие на принципах, заимствованных из нейрофизиологии.

В данной работе мы будем рассматривать нейроподобные сети как вариант вычислительной структуры, построенной на тех же принципах. С точки зрения архитектуры [4, 8, 10] искусственные нейроподобные сети представляют собой вариант параллельной мелкозернистой однородной вычислительной структуры, реализующей потоковую обработку данных.

Эта обработка может быть синхронной и асинхронной. К настоящему времени нейросетевые технологии расширяют возможности при решении задач обработки сигналов и распознавания образов морских объектов.

### 2. Анализ результатов исследования и область их применимости

Анализ использования возможных методов классификации морских объектов и особенностей основной решаемой задачи, а именно создание нейросетевой системы морского мониторинга гидрофизических и геофизических полей морских акваторий позволил выделить два типа нейросетей, наиболее перспективных для решения поставленной задачи: многослойный перцептрон (обучается методом обратного распространения ошибки) и сеть встречного распространения ошибки. Сейчас искусственные нейронные сети являются лишь упрощенным подобием естественных (биологических) нейронных сетей. Нервные системы человека и животных гораздо сложнее тех устройств, которые можно создать с помощью современных технологий. Однако для успешного решения многих практических задач оказалось достаточным «приблизительно» понять общие нормы функционирования нервной системы. Некоторые виды нейронных сетей представляют собой математические модели, имеющие всего лишь отдаленное сходство с нейрофизиологией, что отнюдь не препятствует их практическому применению. Такие характеристики нейросетевых методов, как возможность нелинейного моделирования и сравнительная простота реализации, часто делают их незаменимыми при решении сложнейших многомерных задач [4, 8, 10].

Нейронные сети нелинейны по своей природе и представляют исключительно мощный метод моделирования, позволяющий воспроизводить чрезвычайно сложные зависимости. Кроме того, нейронные сети справляются с «проклятием размерности», которое не позволяет моделировать линейные зависимости в случае большого числа переменных (термин, используемый в отношении ряда свойств многомерных пространств и комбинаторных задач. Впервые термин ввел Ричард Эрнст Беллман применительно к общей задаче динамического программирования [1]. Выражение употребляется в работах по технической кибернетике, машинному обучению и анализу сложных систем, в том числе в заголовках).

Обучение – это итерационная процедура, требующая длительных вычислений. На каждой итерации происходит уменьшение функции ошибки. Если выбраны множество обучающих примеров – пар  $(X_m, Y_m)$  ( $m=1, 2, \dots, M$ ) – и способ вычисления функции ошибки  $D$ , обучение нейронной сети превращается в задачу многомерной оптимизации. Функция  $D$  может иметь произвольный вид. Поэтому обучение в общем случае – многоэкстремальная невыпуклая задача оптимизации.

Для решения этой задачи могут быть использованы алгоритмы: локальной оптимизации с вычислением частных производных первого порядка, локальной оптимизации с вычислением частных производных первого и второго порядка, стохастические алгоритмы оптимизации и алгоритмы глобальной оптимизации.

К первой группе относятся: градиентный алгоритм (метод скорейшего спуска), методы с одномерной и двумерной оптимизацией целевой функции в направлении антиградиента, метод сопряженных градиентов, методы, учитывающие направление антиградиента на нескольких шагах алгоритма.

Ко второй группе относятся: метод Ньютона, методы оптимизации с разреженными матрицами Гессе, квази-ньютоновские методы, метод Гаусса–Ньютона и Левенберга–Марквардта (алгоритм Левенберга–Марквардта – метод оптимизации, направленный на решение задач о наименьших квадратах, альтернатива методу Ньютона, может рассматриваться как комбинация последнего с методом градиентного спуска, или как метод доверительных интервалов; алгоритм был сформулирован независимо Левенбергом в 1944 г. и Марквардтом – в 1963 г.).

Стохастическими алгоритмами являются поиск в случайном направлении, имитация отжига, метод Монте-Карло (численный метод статистических испытаний). Задачи глобальной оптимизации решаются с помощью перебора значений переменных, от которых зависит целевая функция. Для сравнения методов обучения нейронных сетей необходимо использовать в качестве критериев количество шагов алгоритма, необходимых для получения решения и количества дополнительных переменных, которые потребуются для организации вычислительного процесса.

Обобщая сказанное, процесс обучения нейронной сети состоит в поиске целевой функции  $g(E)$ , оптимальной по  $E$ , где  $E$  – синаптическая матрица сети. Обычно это итерационная процедура,

весьма сложная и длительная при ее прямом использовании.

Существуют три парадигмы обучения: с учителем, самообучение и смешанная. В первом случае при обучении используют набор правильных ответов на каждый входной набор и по ним настраивают весовые коэффициенты. При обучении без учителя не требуются знания правильных ответов на каждый обучающий пример. В этом случае раскрывается внутренняя структура данных или корреляция между образцами в системе данных, что позволяет распределить данные по категориям. При смешанном обучении часть весов определяется посредством обучения с учителем, а другая часть получается с помощью самообучения.

Здесь необходимо коротко раскрыть определения фундаментальных проблем обучения: емкости, сложности образов и вычислительной сложности. Емкость – это понятие, связанное с количеством образов, которые может запомнить сеть, и возможностями сети после обучения. Сложность образов определяет число обучающих примеров, необходимых для достижения способности сети к общению. Понятие «вычислительная сложность» подразумевает функцию зависимости объема работы, которая выполняется некоторым алгоритмом, от размера входных данных. Для управляемого обучения сети необходимо подготовить набор обучающих данных. Эти данные представляют собой примеры входных данных (признаков) и соответствующих им выходов (классов). С помощью того или иного алгоритма сеть учится устанавливать связь между первыми и вторыми [3, 8].

Наиболее распространены следующие фундаментальные правила обучения: коррекция по ошибке, алгоритм (машина) Больцмана, набор правил Хебба, обучение методом соревнования (конкуренции), генетический алгоритм. Следует отметить, что во многих практических задачах адаптировать известный алгоритм – не менее сложная задача, чем создать собственный (только под решаемую задачу).

Понятие класса морского объекта (МО) связано с числом характеризующих его классификационных признаков  $N$ , описываемых рядом аппаратно измеренных или расчетных параметров. Каждому классу морского объекта соответствует  $N$  – мерный случайный вектор признаков  $X$ . Вектор признаков описывается строкой фактически полученных значений параметров по одному морскому объекту к моменту принятия решения о ее классе. По терминологии искусственных нейронных сетей такая строка называется строкой фактов (наблюдений). Вопрос о том, сколько таких строк в матрице наблюдений необходимо иметь для обучения нейронной сети, решающей достаточно сложную задачу распознавания морских объектов, непростой. Существуют общие рекомендации относительно оценки размера матрицы данных обучения [1, 3, 7, 8].

Например, выполнение следующего неравенства:  $M > W/\varepsilon$ , где  $M$  – количество данных обучения (строк в матрице),  $W$  – число синаптических связей,  $\varepsilon$  – доля ошибок, допустимая в ходе тестирования. Так, при допустимости 10% ошибок число наблюдений должно быть в 10 раз больше числа имеющихся в сети весовых коэффициентов.

Прежде чем приступить непосредственно к разработке нейронной сети, нужно решить, какие переменные использовать в обучающей выборке. Значения классификационных признаков морского объекта одного класса могут меняться в некоторых пределах, поэтому необходимо знать их статистические свойства. Часть параметров зависят от условий распространения звуковой энергии в морской среде, поэтому при обучении следует учесть изменчивость вертикального распределения скорости звука [4, 6, 8].

Первоначальный выбор исходных переменных (данных обучения) зачастую определяется интуицией эксперта, и возможно включение максимального их числа. На последующих этапах размеры выборки могут корректироваться. Расчеты показывают, что число строк фактов  $M$ , описывающих модель поля скорости звука в заданной пространственно-временной области, должно быть от 30 до 50 тысяч даже без учета требований, выдвинутых в работах [2, 3, 10].

Сформировать обучающую выборку можно двумя путями. Первый сопряжен с накоплением данных в натуральных условиях. Даже при получении большого объема информации таким путем выборки будут ограничены временем проведения измерений и пространством района, они имеют локальный характер, и ценность их как представительного статистического материала для обучения нейросети низка. Если учесть, что обученная нейронная сеть должна обеспечивать принятие решения в пределах некоего интервала глубин расположения шумящего объекта, дистанций и множества вариантов гидрологических условий, связанных с климатической изменчивостью вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ), то получение представительной обучающей выборки в натуральных условиях становится не просто дорогостоящей, но и невыполнимой задачей. Каким бы ни был набор наблюдений в реальных условиях, он не в состоянии отобразить того многообразия ситуаций и явлений, которые могут возникнуть. Кроме того, сбор натуральных данных сопровождается ошибками наблюдений, счисления и гидроакустических измерений, искажениями, отскоками или просто отсутствием данных. От этого не спасают даже современные возможности контроля навигационной обстановки и соблюдение метрологических требований при электроакустических измерениях. Отскоки же, лежащие далеко от области правдоподобных значений некоторой переменной, могут исказить результат обучения. Хотя нейронные сети в целом устойчивы к шумам, у этой устойчивости есть предел. Многочисленные эксперименты по обучению нейронных сетей показали, что совокупное использование алгоритма локальной оптимизации, процедуры «выбивания» сети из локального минимума и процедуры увеличения числа нейронов приводят к успешному обучению нейронных сетей. Оценка адекватности результатов моделирования процесса распространения звука в морской среде выполнялась с использованием данных измерений потерь при распространении звука, полученных в ходе натурального эксперимента, который проводился в соответствии с планом Научно-технического комитета ВМФ РФ на базе Центрального научно-исследовательского испытательного

гидроакустического полигона МО РФ при участии одного из авторов статьи. При этом использовались расчетные потери при распространении звука, полученные по апробированным программам, зарекомендовавшим себя на практике.

### 3. Имитационное моделирование морской обстановки

Следует отметить, что полезность натуральных данных мы не отвергаем вообще, поскольку они могут пригодиться при тестировании уже обученной нейронной сети и при оценке адекватности принятой модели. Поэтому мы предлагаем второй путь – имитационное моделирование информационной ситуации, возникающей в процессе классификации подводных технических объектов комплексной системой морского мониторинга.

Имитационное моделирование обеспечивает достаточно гибкую среду для поиска и проверки исследовательских идей. Для многих приложений такое моделирование оказывается вполне адекватным и достаточным, а в нашем случае – единственным способом оценить возможности классификации в рамках климатической изменчивости морской среды и влияние этой изменчивости на процесс распознавания морских объектов. Имитация должна включать в себя три основных процесса: моделирование навигационной обстановки; моделирование параметров движения морского объекта; моделирование канала распространения звуковой энергии. Имитационная модель – своего рода универсальное средство исследования сложных систем – представляет логико-алгоритмическое описание поведения отдельных компонентов системы и правил их взаимодействия, отображающих последовательность событий, возникающих в моделируемой системе.

В состав имитационной модели комплекса имитационного моделирования (КИМ) должна быть включена модель приемной антенны гидроакустической станции (ГАС) с детерминированными техническими параметрами, глубиной погружения и блоком расчета (измерения) значений параметров классификационных признаков. В этом блоке могут быть использованы правила расчета значений формализованных классификационных признаков. Моделирование навигационной обстановки должно обеспечивать воспроизведение генераций случайных значений координат морского объекта, глубины его погружения и курса. Скорости каждого морского объекта в процессе имитации назначаются в рамках заданных распределений, производится определение соответствующих курсовых углов и пеленгов на объект [2, 6]. Для морского объекта определенного класса необходимо назначить уровни шумоизлучения соответственно его скорости. Построить область сектора, радиус которого должен быть равен предельно возможной дальности действия носителя ГАС, обнаруживающего морской объект. Схема (Рис. 1) иллюстрирует 3D-область, представляющую собой цилиндрический сектор, радиус которого, должен быть равен предельно возможной дальности действия ГАС, обнаруживающего МО.

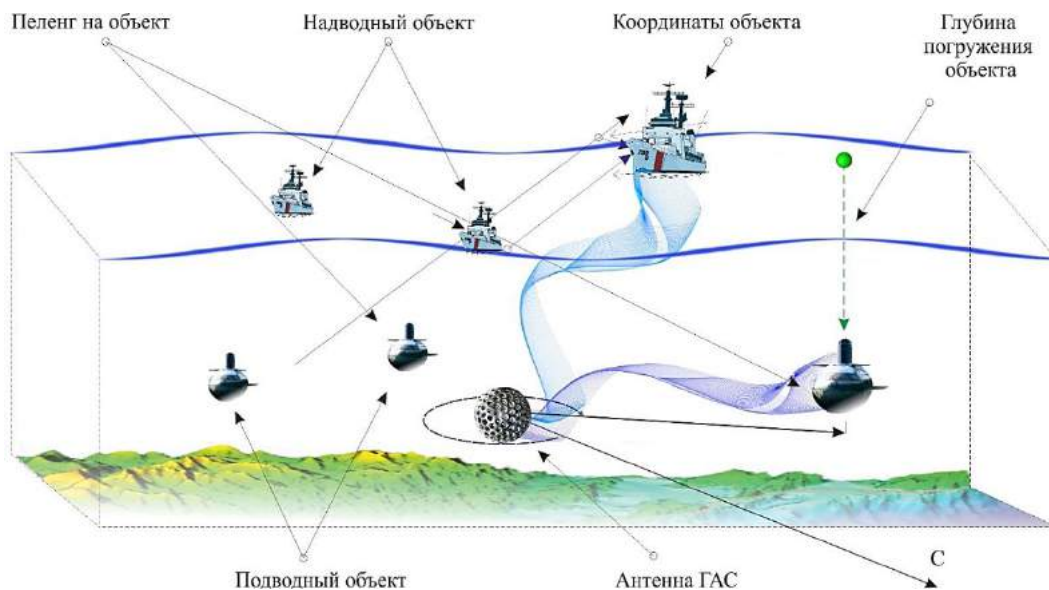


Рис. 1. Область имитационной модели морской навигационной обстановки

По координатам объектов производится расчет фактических дистанций до каждой из них и соответствующих этим дистанциям потерь на распространение, согласно принятой модели канала распространения. В качестве модели канала распространения в работе применяется модель, разработанная В.Н. Матвиенко и Ю.Ф. Тарасюк [6]. Модель распространения гидроакустических сигналов базируется на представлении среды с помощью плоскопараллельных слоев, с постоянными значениями градиентов скорости звука.

В качестве главного объекта модели канала распространения, определяющего имитацию изменчивости потерь на распространение, используем статистическую климатическую модель вертикального распределения скорости звука. Методическая основа выделения представительных кривых ВРСЗ в заданном районе-сезоне (пространственно-временной области), согласно этой модели [4] подразумевает, что каждой из таких кривых может быть поставлена в соответствие тройка чисел, характеризующих вероятностную оценку значимых параметров вертикальной структуры поля скорости звука:  $\{P_{TRCЗ}, P_{OT}, P_{BPCЗ}\}$ . Обозначив соответствующие вероятности через  $P_1 - P_3$ , в терминах нечетких множеств можем записать модель поля скорости звука в заданной пространственно-временной области:

$$C = \{T_i P_{1i} + N_i P_{2i} + C(H)_i P_{3i}\},$$

где  $T_i$  – тип распределения скорости звука по глубине  $i$ -й представительной кривой ВРСЗ;  $N_i$  – глубина залегания опорных точек;  $C(H)_i$  – значения скорости звука на стандартных горизонтах.

Имитационное моделирование непосредственно процесса подводного распространения звука проводилось нами с целью генерации набора данных для формирования обучающей выборки комплексом имитационного моделирования. Программа расчета параметров гидроакустического поля (ПГАП)

«Дальность» (элемент структуры КИМ) основана на лучевом приближении решения волнового уравнения. Лучевая теория позволяет получить важные сведения о распространении звука в морской среде. Расчетные модули программы работают с данными натурных измерений и осуществляют автоматизированную выборку данных из баз многолетней гидрологической информации.

Программа «Дальность» позволяет моделировать процесс распространения акустических сигналов в морской среде для двумерно-неоднородного канала распространения звука и оценивать поведение анализируемых параметров (аномалия распространения, потери на распространение, оптимальный угол наклона характеристики направленности антенны и др.) в заданной пространственно-временной области.

Основным критерием применимости методики и реализующей ее программы расчета ПГАП является адекватность модели данных натурным измерениям. Критерием может служить точность измерения уровня звукового давления в морских условиях, которая может изменяться в пределах от 2 до 4 дБ.

Для сравнения будем использовать меру различия значений потерь при распространении звука, полученных в ходе эксперимента, и потерь при распространении звука, рассчитанных по программе «Дальность» для данных натурального эксперимента.

На графиках (Рис. 2) представлены: гистограмма и кумулята, построенные для трехсот значений, вычисленных как разность между натурно измеренными и расчетными потерями при распространении звука, иллюстрирующие, что 68% данных входит в интервал от 0 до 4 дБ.

Это позволяет сделать вывод, что результаты программы «Дальность» хорошо согласуются с натурными измерениями потерь на распространение звука.

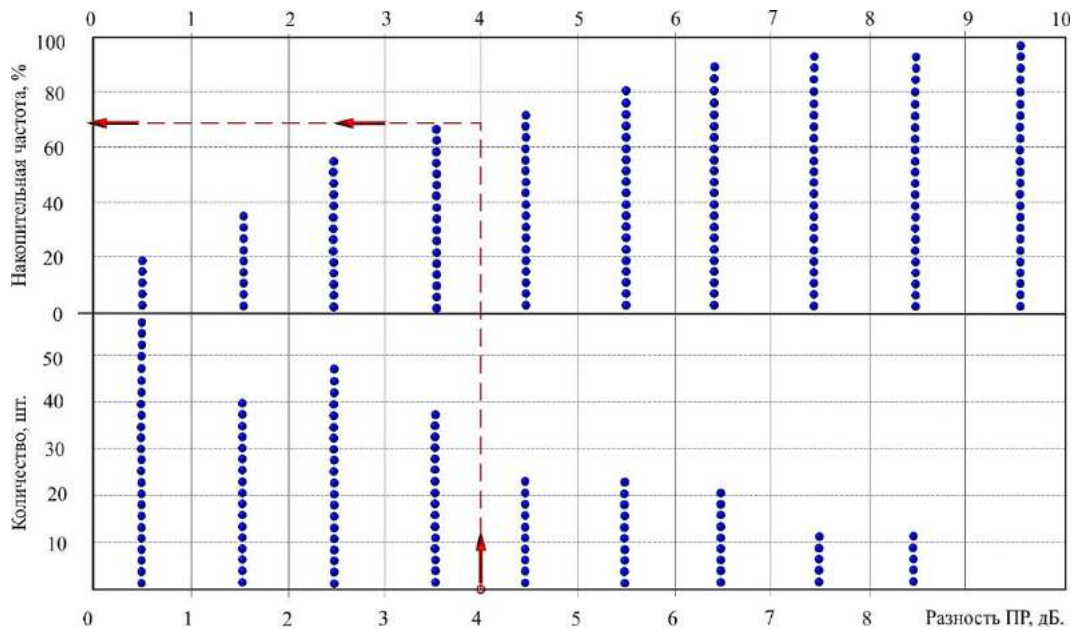


Рис. 2. Оценка меры различия расчетных и натурных данных о потерях при распространении звука. Частота – 108 Гц, глубина источника – 50 м, глубина приемника – 520 м

Оценка адекватности методики расчета ПГАП может быть получена при ее сравнении с апробированными программами. Такой подход оправдан, если речь идет о прогнозе потерь при распространении звука в районе со сложными гидрологическими условиями, где большое время проведения натурных измерений на протяженной трассе отдаляет полученные результаты от истинных значений. Сравнение значений потерь при распространении звука, рассчитанных по программе «Дальность», с результатами известных программ «Горизонт» и «FIELD» (элементы структуры КИМ) показало их хорошее согласование.

Для примера на рис. 3. представлены гистограмма и кумулята, построенные для двухсот разностных значений потерь при распространении звука, рассчитанных по программам «Дальность» и «FIELD», иллюстрирующие, что 94% данных входят в интервал от 0 до 4 дБ.

Одной из особенностей моделирования морской обстановки является необходимость имитации функционирования множества сложных объектов, входящих в ее состав. В частности, к таким объектам относятся надводные корабли и подводные лодки, летательные аппараты, стационарные объекты (буи, нефтяные вышки и т.п.).

Большинство объектов являются сложными техническими системами. В связи с этим имитационное моделирование полноценной морской обстановки позволяет сформировать выборку с

необходимым количеством данных для обучения нейронных сетей.

Целесообразность дальнейшей разработки кратко описанного ниже КИМ, обеспечивающего эффективность формирования обучающей выборки для нейросетевых линий классификации МО и представляющего собой неотъемлемую часть процесса создания системы мониторинга полей различной физической природы в морской среде [8], должна стать предметом дальнейшего исследования на основании результатов проводимого тестирования.

Считаем необходимым хотя бы очень кратко остановиться на описании разработанного и тестируемого КИМ навигационной обстановки. Задача конфигурирования системы имитационного моделирования заключается в нахождении соответствия между объектами и моделями. Конфигурирование осуществляется на этапе инициализации вычислительно-моделирующего комплекса (ВМК). Хранение входных и выходных параметров моделей и передача их между компонентами КИМ обеспечиваются ВМК.

Возможность динамического конфигурирования КИМ основывается на классификации объектов и имитационных моделей, унификации динамических параметров объектов морской обстановки, унификации программного интерфейса имитационных моделей, унификации программного интерфейса модулей библиотеки моделей.



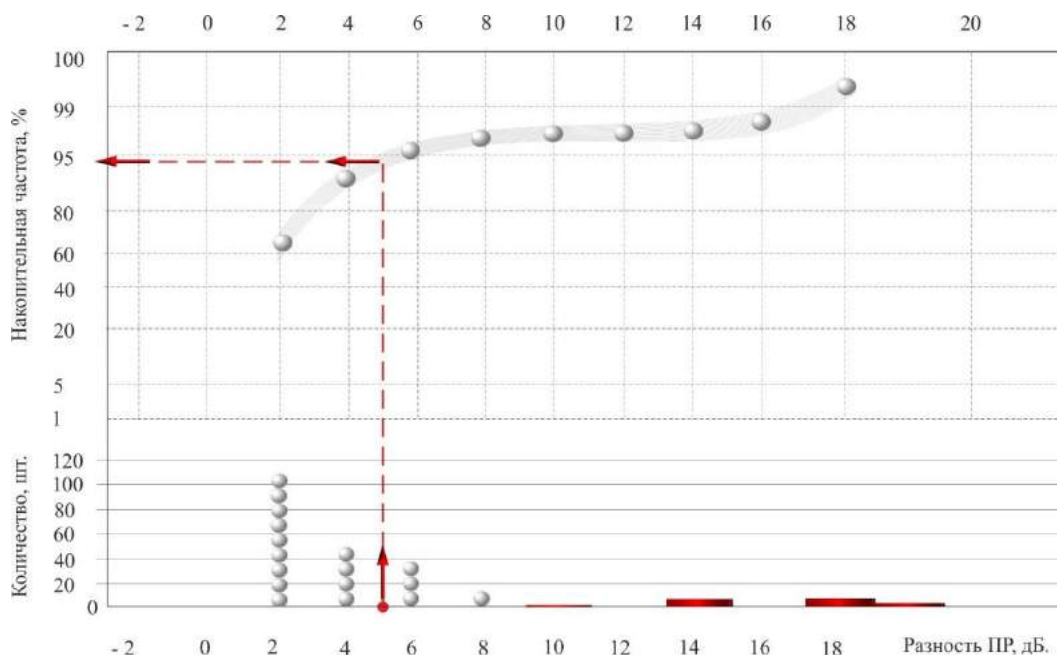


Рис. 3. Разностные значения потерь при распространении звука, рассчитанные по программам «Дальность» и «FIELD».

Классификация объектов обеспечивает возможность разработки специализированных моделей для объектов различной физической природы и характеризовать их различными параметрами в ВМК. Унификация программного интерфейса моделей позволяет производить операции с моделями различных МО. За счет этого обеспечивается независимость программной реализации от реализации частных имитационных моделей. Задача унификации программного интерфейса моделей решена на базе объекто-ориентированной технологии программирования.

Все имитационные модели МО реализованы в виде классов, наследников базового класса, определяющего единый интерфейс модели. Интерфейс имитационной модели определяет основные функции моделирования, которые вызываются на КИМ (см. Таблицу).

Приведенные функции обеспечивают осуществление базовых операций над моделью, включая сохранение и восстановление состояния модели. Изменение динамических параметров МО

осуществляется в функции Run, из которой реализуется вызов частных моделей процессов функционирования объекта.

Реализации имитационных моделей объектов размещаются в программных модулях (DLL). Произвольный набор программных модулей образует библиотеку моделей объектов морской обстановки. Унификация программного интерфейса модулей реализации моделей позволяет при загрузке задания на моделирование информационной ситуации навигационной обстановки поставить каждому МО в соответствие имитационную модель.

Реализация программного интерфейса модулей основана на возможности экспортируемых функций DLL. Каждый модуль библиотеки имитационных моделей экспортирует две функции, обеспечивающие:

- получение информации о реализованных в модуле моделях (GetOwnAlgoInfo);
- создание экземпляра выбранной имитационной модели (CreateOwnAlgo).

Таблица

Базовые функции модели объекта обстановки

Функция базового класса	Функция базового класса Назначение
Init	Функция инициализации модели
IsReady	Проверка готовности модели к работе
Idle	Выполняется постоянно с момента создания модели вне зависимости от ее готовности
Run	Выполнить шаг моделирования
Destroy	Прекратить выполнение модели
GetData	Сохранение внутренних данных модели в неформатированный буфер
SetData	Восстановление внутренних данных алгоритма из неформатированного буфера
GetLastError	Получить строку-сообщение о последней ошибке

Первая функция позволяет получить список реализованных в модуле моделей и их

классификационные признаки (для какого класса и типа объектов предназначена модель).

Классификация моделей совпадает с классификацией объектов, однако в отличие от нее допускает неопределенность. То есть для имитационной модели может быть не указан конкретный класс и наименование объекта, в этом случае модель подходит для моделирования объектов указанного типа и различных классов и наименований.

Алгоритм загрузки имитационных моделей по полученному из задания на моделирование информационной ситуации находит наиболее полно соответствующую модель МО и использует функцию CreateOwnAlgo для создания экземпляра этой модели.

Реализованное таким образом динамическое конфигурирование КИМ позволяет:

максимально быстро получить функционирующий вариант модели морской обстановки на основе минимального количества частных моделей;

увеличивать количество и качество моделей МО;

разрабатывать частные имитационные модели информационной ситуации навигационной обстановки.

#### 4. Обсуждение результатов

Таким образом, при удовлетворительных результатах тестирования дальнейшая разработка КИМ, обеспечивающего эффективность формирования обучающей выборки для нейросетевых линий классификации МО, системы мониторинга гидрофизических и геофизических полей морских акваторий с использованием нейросетевых технологий, должна подразумевать решение следующих задач:

имитации мгновенного расположения распознаваемого объекта и параметров его движения относительно носителя ГАС;

имитации климатической изменчивости ВРСЗ, а, следовательно, и параметров гидроакустических полей с использованием базы данных типичных кривых вертикального распределения скорости звука;

имитации информационных потоков, возникающих в дуэльных ситуациях «приемник–источник» с записью полученных данных, в том числе и о параметрах классификационных признаков, на магнитные носители;

разработки модуля управления имитационной моделью; оценки адекватности модели; оптимизации имитационной модели.

В представленной к обсуждению работе рассмотрены некоторые типы нейроподобных сетей для решения следующих задач: имитации мгновенного расположения распознаваемого объекта и параметров его движения; имитации климатической изменчивости вертикального распространения скорости звука в воде и параметров гидроакустических полей с использованием базы данных типичных кривых вертикального распределения скорости звука; имитации информационных потоков, возникающих в ситуациях «приемник–источник»; разработки модуля управления имитационной моделью; оценки адекватности модели.

Отметим, что существующие методы распознавания, базирующиеся на развитой алгоритмической и технической базе, применяемые для распознавания морских объектов, в конечном счете определяются подготовкой эксперта-пользователя (оператора), т.е. использование нечеткой логики не вносит диссонанс в построение систем распознавания. Сети, построенные на нечетких множествах, весьма эффективны, что подкреплено рядом доказанных теорем, аналогичных теоремам о полноте для искусственных нейронных систем. Возможно одновременное использование различных композиций нечетких выводов. Сама схема выводов может быть многокаскадной. Перспективы такого подхода: можно принимать правильные решения в условиях неполной и нечеткой входной информации об идентифицируемом объекте. Нечеткая логика в решении этих задач оказывается особенно полезна, когда в рассуждении присутствует неопределенность, которая затрудняет или даже исключает применение точных количественных методов и подходов.

С помощью методов теории нечетких множеств можно получать аналитические выражения для количественных оценок нечетких условий принадлежности признаков к тому или иному множеству (группе классификационных признаков объекта распознавания). Они позволяют эффективно решать сложные задачи обработки информации, когда классы, подлежащие разделению, имеют произвольную форму и пересекаются между собой, отличаются высокой точностью и эффективностью в условиях неопределенности, низким временем обучения, надежностью против помех.

#### Заключение

В заключение отметим, что обучение нейронной сети экспертной системы мониторинга и классификации источников гидрофизических и геофизических полей морских акваторий с использованием имитационного моделирования информационной ситуации и методов нечеткой логики позволит оператору (обучающему эксперту) сформировать и проверить выборку с необходимым количеством данных для обучения нейронных сетей системы мониторинга полей различной физической природы в морской среде. При этом обучающий эксперт сможет владеть не только данными, доступными оператору ГАС на момент обнаружения, но и точными параметрами движения морского объекта, которые обеспечивают контроль обучения, но в обучающую выборку не входят. От сформированной обучающей выборки зависит эффективность процесса обучения, способность сети решать поставленные перед ней проблемы во время эксплуатации. На этом этапе кроме параметра качества подбора весов важную роль играет время обучения. Как правило, эти два параметра связаны обратной зависимостью, поэтому их приходится выбирать на основе компромисса.

## Литература

1. Беллман Р., Энджел Э. Динамическое программирование и уравнения в частных производных. М.: Мир, 1974. 205 с.
2. Дорогов А.Ю. Сколько примеров требуется для обучения нейронной сети? // VIII Междунар. конф. «Нейроинформатика и ее приложения»: тез. докл. Красноярск, 2000. С. 59–60.
3. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. М.: Вильямс, 2001. 290 с.
4. Клименчук И.Н. Петухов В.И. Статистическая климатическая модель поля скорости звука для прикладных гидроакустических исследований. Подход с использованием ЭВМ // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ: сб. науч. тр. Владивосток: ТОВВМУ, 1989. С. 35–36.
5. Люгер Д.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. М.: Вильямс, 6. 2005. 864 с.
6. Матвиенко В.Н., Тарасюк Ю.Ф. Дальность действия гидроакустических средств. Л.: Судостроение, 1981. 208 с.
7. Об утверждении Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 г. Постановление Правительства Российской Федерации от 8 декабря 2010 г., № 2205-р. URL: <https://rg.ru/2010/12/21/mordeyatelnost-site-dok.html> (дата обращения: 10.08.2017).
8. 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.
9. 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.
10. Kohonen T. Self-organized formation of topologically correct feature maps. Biological Cybernetics. Berlin and New York, 2001, 501 p.
11. Skarsoulis E., Papadakis P., Kalogerakis M., Piperakis G., Orfanakis E. A passive acoustic localization system for broadband sources. Proceedings of 3<sup>rd</sup> Underwater Acoustics Conference and Exhibition, 21–26 June 2015, Crete Island, Greece. 2015, p. 341-348.

## References

1. Bellman R., Angel E. Dynamic Programming and Partial Differential Equations. M., Mir, 1974, 205 p.
2. Dorogov A.Yu. How many examples required for training a neural network? Proc. 8th all-Russ. sem. Neuroinformatics and its applications. Krasnoyarsk, 2000, p. 59-60.
3. Kallan R. The essence of neural networks. M., Vilyams Publ., 2001, 290 p.
4. Klimenchuk I.N., Petuhov V.I. Statistical climate model of the velocity field of the sound for applied hydro-acoustic research. Approach using a computer. Proc. of Makarov Pacific Higher Naval College. Vladivostok, 1989, vol. 1, p. 35-36.
5. Luger D.F. Artificial intelligence: strategies and methods for solving complex problems. M., Williams Publ., 2005, 864 p.
6. Matvienko V.N., Tarasyuk Yu.F. The range of acoustical means. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1981, 208 p.
7. On the approval of the Strategy for the development of maritime activities of the Russian Federation until 2030. Decree of the Government of the Russian Federation of December 8, 2010, N 2205-r. URL: <https://rg.ru/2010/12/21/mordeyatelnost-site-dok.html> – 10.08.2017.
8. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Xotinskij O.V. Raspoznvanie i klassifikaciya istochnikov formirovaniya polej razlichnoj fizicheskoj prirody v morskoy srede: monografiya. – Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2017. – 255 s.
9. 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]. Certificate RF No. 2018612169, 2017.
10. Kohonen T. Self-organized formation of topologically correct feature maps. Biological Cybernetics. Berlin and New York, 2001, 501 p.
11. Skarsoulis E., Papadakis P., Kalogerakis M., Piperakis G., Orfanakis E. A passive acoustic localization system for broadband sources. Proceedings of 3<sup>rd</sup> Underwater Acoustics Conference and Exhibition, 21–26 June 2015, Crete Island, Greece. 2015, p. 341-348.

УДК 519.68:15:681.5

## ПЛАНИРОВАНИЕ МАРШРУТА ПЕРЕХОДА СУДНА С УЧЁТОМ ОПАСНОСТИ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ

**Денис Александрович Акмайкин**

кандидат физико-математических наук  
заведующий кафедрой Радиоэлектроники и радиосвязи  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел. +7(902) 556-22-28, e-mail: akmaykin@gmail.com

**Олег Алексеевич Букин**

доктор физико-математических наук, профессор  
директор научно-инновационного комплекса Морской технопарк  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел. 8 (423) 2-3012-57 доб. 60-25, e-mail: o\_bukin@mail.ru

**Виктор Михайлович Гриняк**

доктор технических наук, доцент  
профессор кафедры Информационных технологий и систем  
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса  
190014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41  
тел. + 7 (904) 623-42-35, e-mail: victor.grinyak@gmail.com

**Михаил Анатольевич Москаленко**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Теории и устройства судна  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел. +7(902) 4812121, e-mail: asmsh@rambler.ru

### Аннотация

Статья посвящена проблеме безопасности движения морских судов. Рассматривается задача планирования маршрутов перехода судов с учётом неблагоприятных погодных условий – морского волнения – по пути следования. В качестве метрики, характеризующей безопасность движения, используется известная диаграмма штормования судов на попутном волнении. Согласно ей определяется уровень опасности по данным о высоте и длине волны. Маршрут перехода формируется как результат решения задачи поиска кратчайшего пути на взвешенном графе. В качестве источника метеоданных данных использована информация спутникового мониторинга. Показано, что несмотря на грубость исходных данных, они способны дать пригодное для практики решение по выбору траектории движения судна. Работа сопровождается результатами натурных исследований: приведены результаты оценки опасности движения судов и безопасных путей плавания в акватории Японского моря.

**Ключевые слова:** безопасность судоходства, морское волнение, траектория движения, диаграмма штормования, кратчайший путь

## SHIPS ROUTE PLANING WITH THE ACCOUNT OF DANGEROUS SEA WAVES

**Denis A. Akmaykin**

Cand. Sci. Phys.-math.  
Director of the Radioelectronik and radiocommunication department  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel. +7(902) 556-22-28, e-mail: akmaykin@gmail.com

**Oleg A. Bukin**

Dr. Sci. Phys.-math., professor  
Director of scientific innovation complex Marine technological park  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel. 8 (423) 2-3012-57 ext. 60-25, e-mail: o\_bukin@mail.ru

**Victor M. Grinyak**

Dr.Sci.Tech., associate professor  
Professor of department of Information systems and technologies  
Vladivostok State University of Economics and Service  
41, Gogolya str., Vladivostok, 690014, Russia  
tel. + 7 (904) 623-42-35, e-mail: victor.grinyak@gmail.com

**Mikhail A. Moskalenko**

Dr.Sci.Tech.6 professor

Professor of Ship theory and structure department

Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi

50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia

tel. +7(902) 4812121, e-mail: asmsh@rambler.ru

**Abstract**

The problem of marine traffic safety is discussed in this paper. The problem of ships path planning taking into account heavy weather conditions (sea waves) along the route is considered. As a metric characterizing the safety of traffic, a well-known storm diagram of ships at a passing wave is used. According to it, the level of danger is determined from the data on height and wavelength. The route is formed as a result of solving the problem of finding the shortest path on a weighted graph. As a source of meteorological data, satellite monitoring information is used. It is shown that in spite of the roughness of the initial data, they are able to give a practical solution for choosing the trajectory of the vessel's motion. The work is accompanied by the results of full-scale experiments. The results of the assessment of the vessels safety and path planning in the waters of the Sea of Japan are presented.

**Key words:** marine safety, sea waves, path planning, storm diagram, shortest path

**Введение**

Обеспечение безопасности движения морского судна представляет собой актуальную, сложную и многоаспектную проблему. В рамках неё выделяются задачи планирования пути: траектории движения судна на локальной акватории и маршрута перехода от порта отправления к порту назначения. Целью планирования траектории судна на локальной акватории является обеспечение навигационной безопасности в условиях коллективного движения [1]. Основной задачей планирования маршрута перехода является оптимизация движения, например, плавание по кратчайшему из возможных путей, за кратчайшее время, с минимальным расходом топлива и т.п. [2].

Погодные условия по пути следования судна оказывают существенное влияние на выбор его маршрута, так как характер движения в штормовых условиях коренным образом отличается от такового в спокойную погоду. Определение параметров волнения, при которых его неблагоприятное влияние становится существенным, и прокладка маршрута в обход опасных участков являются важными составляющими работы судоводителя. Перспективным здесь является использование информации, предоставляемой специальными метеосервисами по данным спутникового мониторинга. Комплексирование данных нескольких метеоспутников способно дать достаточно адекватную картину текущих и прогнозируемых погодных условий [3].

В настоящей работе рассматривается задача планирования маршрута перехода с учётом информации о параметрах морского волнения – высоте и длине волны. Математическая модель задачи основана на поиске кратчайшего пути на взвешенном графе и отраслевых представлениях об оценке безопасности плавания, выраженных диаграммами штормового плавания судна [4]. Результаты решения задачи позволяют выбирать маршрут перехода судна, обеспечивающий безопасное движение.

**1. Основные модельные представления**

Основными параметрами морского волнения, учитываемыми при такой оценке его опасности, являются высота  $h$  и длина  $\lambda$  волн, направление и скорость их распространения, длина судна  $L$ , курс и

скорость его движения. Так, отношение длины волны к длине судна  $\lambda / L \in [0.7 \div 1.3]$  считается неблагоприятным, а при определённых (зависящих от размеров судна) значениях высоты волн – опасным. На диаграмме (Рис. 1) показаны области отношений длины волны к длине судна и средней высоты волны  $h_{\text{сред}}$  к расчётной высоте волны  $h_{\text{расч}} = 0.22L^{0.175}$ , при которых неблагоприятное влияние попутных волн на судно считается заметным.

Внутреннему (заштрихованному) многоугольнику соответствует область наиболее опасных для судна волн; степень опасности возрастает по мере приближения отношения  $\lambda / L$  к 1 и увеличения высоты волны. Внешний многоугольник соответствует неблагоприятным значениям параметров волнения. В этом случае следует оценивать его безопасность по диаграммам штормового плавания [4].

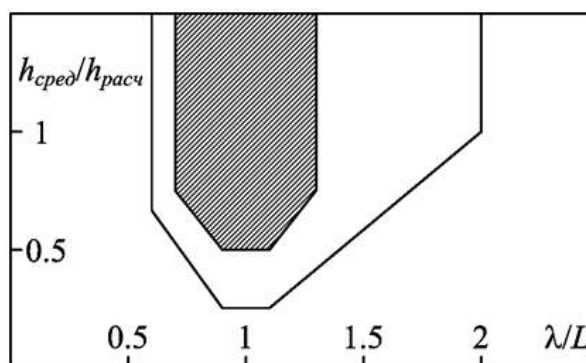


Рис. 1. Диаграмма штормового плавания на попутном волнении

В рамках рассматриваемой задачи предлагается использовать систему координат  $x, y$ , где ось абсцисс  $x$  соответствует географической долготе, а ось ординат  $y$  – географической широте судна. Каждой точке акватории с координатами  $x, y$  соответствует уровень опасности волнения  $u(x, y)$ . При следовании судна по траектории, задаваемой кривой  $q$ , оно подвергнется воздействию волн, описываемому криволинейным интегралом первого рода

$$U = \int_q u(x, y) dq \tag{1}$$

Для вычисления этого интеграла его удобнее представить в виде

$$U = \int_q u(x, y) dq = \int_{t_1}^{t_2} u(x, y) \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} dt, \tag{2}$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – время начала и окончания движения судна по кривой  $q$ .

Примем, что оптимальной траекторией движения судна из множества возможных является кривая  $q^*$ , обеспечивающая минимум функционала  $U$ , так что

$$q^* = \operatorname{argmin}_q U(q). \tag{3}$$

Решение задачи (3) методами математической физики, вариационного исчисления или динамического программирования [5] характеризуется высокой вычислительной сложностью. Поэтому в настоящей работе предлагается интерпретировать её поиском кратчайшего пути на взвешенном графе. Этот приём хорошо зарекомендовал себя в задачах судовождения [6, 7].

Рассматриваемая акватория представляется множеством из  $N$  точек  $p_i$  с координатами  $x_i, y_i$ . Одна из точек –  $p_1$  – соответствует точке начала движения судна, и одна из точек –  $p_N$  – конечной точке маршрута. Вес ребра графа  $d_{ij}$ , соединяющего точки  $p_i$  и  $p_j$  соответствует функционалу (1) в предположении о прямолинейном движении.

Таким образом, может быть поставлена задача о разбиении участка поверхности вершинами графа  $p_i$ , определении множества рёбер графа и поиске кортежа вершин  $\{p_1, \dots, p_N\}$ , обеспечивающего кратчайший путь на заданном графе с учётом принятой метрики  $d_{ij}$ .

Разбиение вершинами графа. Пусть множество возможных маршрутов судна лежит на плоскости  $xy$  внутри квадрата со стороной, равной длине отрезка с вершинами в начальной и конечной точках маршрута ( $p_1$  и  $p_N$  соответственно). Точка  $p_1$  лежит в середине стороны квадрата, а точка  $p_N$  – в середине противоположной стороны (то есть отрезок  $p_1 p_N$  делит квадрат пополам). Квадрат заполняется точками так, чтобы они образовывали правильную прямоугольную сетку.

Пусть  $n$  – число точек, разбивающих отрезок  $p_1 p_N$ , а  $m$  – число рядов точек справа и слева от этого отрезка. Тогда  $nm + n$  – число точек, лежащее

внутри квадрата, а общее число вершин графа с учётом начала и конца маршрута равно  $nm + n + 2$ .

Определение множества рёбер графа. Простейшим множеством рёбер графа является случай, когда каждая вершина соединяется с каждой, получая таким образом

$$(nm + n + 2)(nm + n + 2) / 2 \text{ рёбер.}$$

Для протяжённых маршрутов, где  $n$  – велико, это приводит к неоправданному росту времени поиска кратчайшего пути.

Существенно уменьшить число рёбер можно с учётом специфики судоводительской практики. Вершины графа, лежащие на отрезках, перпендикулярных отрезку  $p_1 p_N$  назовем слоями вершин.

Задаётся условие, что при движении судна возможны переходы только от одного слоя вершин к следующему ближайшему слою, а движения между вершинами одного слоя или между вершинами далекого отстоящих слоёв запрещены.

С учетом того, что имеется  $n$  слоёв по  $m + 1$  вершин в каждом, а также вершины начала и конца, число рёбер станет равным  $(n - 1)(m + 1)^2 + 2(m + 1)$ .

Поиск кратчайшего пути на графе. Особенностью рассматриваемой задачи является наличие запрещённых для плавания путей, обусловленных географией района. В том случае, если одна из вершин либо часть инцидентного им ребра попадает на запрещённый участок (например, на сушу), вес ребра принимается равным бесконечности. В остальных случаях вес рёбер графа задаётся согласно метрике (1). Поиск кратчайшего пути от вершины  $p_1$  до вершины  $p_N$  может быть проведён любым известным алгоритмом общего назначения (Дейкстры, Беллмана-Форда и др.).

## 2. Результаты натурных исследований

Ниже приведены результаты расчётов, сделанных по данным о морском волнении в районе Японского моря. Данные были получены по результатам спутникового мониторинга.

Уровень опасности волнения задавался согласно диаграмме (Рис. 1) следующим образом. Если точка лежит во внутреннем многоугольнике рис. 1, то  $u = 10$  (высокая опасность); если точка лежит за пределами внешнего многоугольника рис. 1, то  $u = 1$  (безопасное волнение); если точка лежит во внешнем многоугольнике рис. 1, то  $u$  принимает значения в диапазоне от 1 до 10 пропорционально расстояниям до границ внешнего и внутреннего многоугольников.

Поиск кратчайшего пути на графе осуществлялся алгоритмом Дейкстры.

На схематичной карте (Рис. 2) показаны результаты расчётов наиболее безопасного маршрута для судна длины 100м., движущегося от Цусимского пролива до пролива Лаперуза по метеоданным на 23 января 2018 года.

На схематичной карте (Рис. 2 а) приводятся значения средней высоты волн.



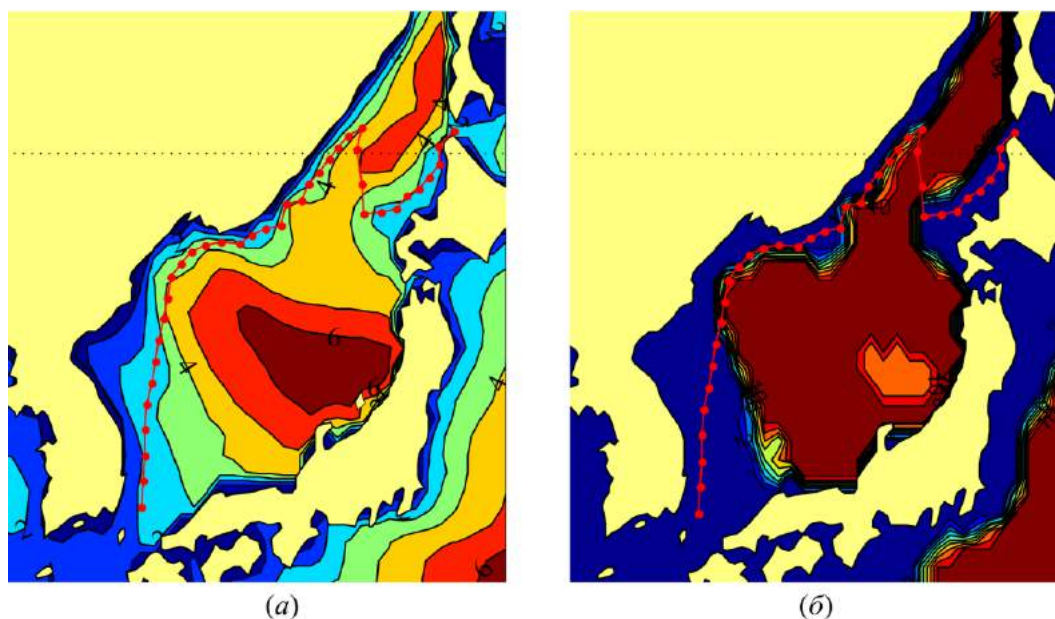


Рис. 2. Результаты расчёта наиболее безопасного маршрута для судна длиной 100 метров. (а) – на фоне данных о высоте волн, (б) – на фоне значений уровня опасности

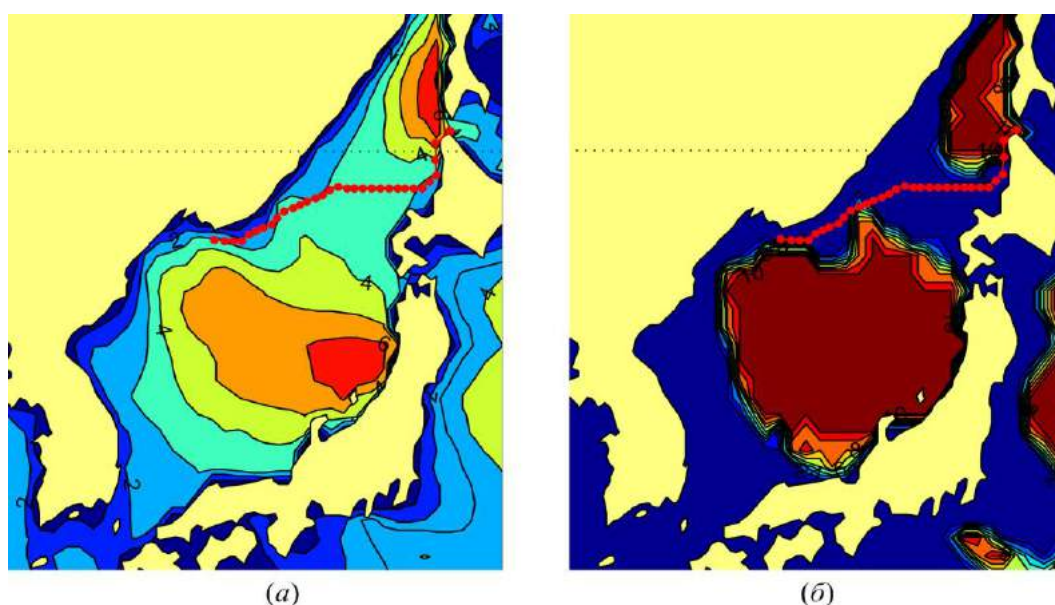


Рис. 3. Результаты расчёта наиболее безопасного маршрута для судна длиной 100 метров спустя сутки. (а) – на фоне данных о высоте волн, (б) – на фоне значений уровня опасности

Уровни опасности попутного морского волнения, соответствующие диаграмме (Рис. 1), показаны на карте (Рис. 2 б).

Приведены также результаты расчётов маршрута при разбиении вершинами графа для  $n = 30$ ,  $m = 40$  (красная линия с точками). Средняя высота волн в некоторых районах достигает 4-6 метров (жёлтая, оранжевая и красная зоны рис. 2а). Значительная часть акватории характеризуется высоким уровнем опасности (внутренний многоугольник диаграммы, Рис. 1 – темно-красная зона на карте Рис. 2б).

Видно, что характер волнения делает возможным относительно безопасное движение судна в основном вдоль побережья, у судна нет возможности

обойти зону опасного волнения и часть маршрута проходит через опасный участок.

В рассмотренном примере время перехода от Цусимского пролива до пролива Лаперуза может занять более 2 суток. При скорости движения судна 10 узлов судно движется по рассчитанному маршруту в течение одних суток, за это время происходит обновление данных о погоде и снова рассчитывается безопасный маршрут (т.е. задача решается итерационно, по мере обновления данных). На схематичной карте (Рис. 3) приведены результаты расчётов наиболее безопасного маршрута по данным на 24 января 2018 года (то есть спустя сутки) при движении от достигнутой за сутки точки в районе порта Находка до пролива Лаперуза Как и в случае

рис. 2 разбиение вершинами графа сделано для  $n = 30$ ,  $m = 40$ . Видно, что области с опасной волной за сутки несколько изменили свои очертания и местоположение, вход в пролив Лаперуза оказался практически «запертым» опасной зоной (Рис. 3 б). Возможно, на практике судоводителю следует отказаться от плавания по рассчитанному маршруту и подождать наступления более благоприятных погодных условий.

### Заключение

Предложенный способ нахождения безопасных маршрутов позволяет сформировать систематизированное представление о степени потенциальной опасности, «поджидающей» судоводителя по пути следования судна к точке назначения.

Определённую проблему представляет высокая вычислительная сложность задачи поиска кратчайшего пути на графах при использовании точных алгоритмов. Здесь перспективным является обращение к алгоритмам эвристического типа. Так, в работе [2] для поиска оптимальных по времени и

экономике маршрутов авторы предлагают использовать генетический алгоритм.

В работе [5] – формировать множество допустимых траекторий, лежащих «справа» и «слева» от дуги большого круга. При большой размерности графа определённые перспективы открывает также использование муравьиных алгоритмов [2].

Возможно также использовать подход, связанный с уменьшением числа вершин, «участвующих» в поиске кратчайшего пути [7]. Несмотря на то, что это – приближённые методы, дающие не точное, а лишь близкое к нему решение, в рассматриваемой задаче такой подход оправдан: из-за динамически меняющейся метеообстановки даже точные алгоритмы поиска пути будут находить лишь «кусочно-статическое» оптимальное решение, которое, конечно же, не будет являться оптимальным решением динамической задачи.

В настоящей работе рассмотрена функция опасности на основе диаграммы штормования на попутном волнении. Возможны и другие метрики опасности метеообстановки.

### Литература

1. Lazarowska A. Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony optimisation // Journal of Navigation. – 2015. – Vol. 68. – Is. 2. – Pp. 291–307.
2. Wang, H., Li, X., Li, P., Veremey, E., Sotnikova, M. Application of Real-Coded Genetic Algorithm in Ship Weather Routing // Journal of Navigation. – 2018. – Vol. 71. – Is. 4. – Pp. 989-1010.
3. Акмайкин Д.А., Букин О.А., Гриняк В.М. Комплексное использование данных метеоспутников для измерения параметров ветра и волнения вдоль маршрута судна // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т.9. – №5. – С. 941–953.
4. Выбор безопасных скоростей и курсовых углов при штормовом плавании судна на попутном волнении: РД 31.00.57.2.-91 – Утв. М-вом транспорта Рос. Федерации 22.02.93; введ. в действие с 01.09.93. – СПб: ЗАО "ЦНИИМФ", 2002. – 59 с. – №РД 31.00.57.2.-91.
5. Сотникова М.В. Алгоритмы формирования маршрутов движения судов с учетом прогноза погодных условий // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2009. – №2. – С. 181-196.
6. Чертков А.А. Автоматизация выбора кратчайших маршрутов судов на основе модифицированного алгоритма Беллмана–Форда // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. - 2017. - Т.9. - №5. С. 1113–1122.
7. Акмайкин Д.А., Ключева С.Ф., Салюк П.А. Эвристический поиск оптимального маршрута судна по северному морскому пути // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2015. – №5. – С. 55–62.

### References

1. Lazarowska, A. (2015) Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony optimisation. Journal of Navigation. 68(2), 291–307. DOI: 10.1017/S0373463314000708.
2. Wang, H., Li, X., Li, P., Veremey, E., & Sotnikova, M. (2018) Application of Real-Coded Genetic Algorithm in Ship Weather Routing. Journal of Navigation. 71(4). 989-1010. DOI:10.1017/S0373463318000048.
3. Akmaykin, A.A., Bukin, O.O., Grinyak, V.M. (2017) Complex employment of data of meteorological satellites for meterage wind and wave parameters along the ship's route // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova 9(5). 941–953. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122.
4. Vybora bezopasnykh skorostey i kursovykh uglov pri shtormovom plavanii sudna na poputnom volnenii. 31.00.57.2.-91 – Ministerstvo transporta Rossii 22.02.93; from 01.09.93. SPb: 2002. 59 p.
5. Sotnikova, M.V. Algorithms of marine ships routing taking into account weather forecast (2009). Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seria 10, Prikladnaa matematika, informatika, processy upravleniya. (2). 181-196.
6. Chertkov, A.A. (2017) Automation selection shortcuts routes of ships on the basis of modified Bellman-Ford Algorithm. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova 9(5). 1113–1122. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1113-1122.
7. Akmaykin, D.A., Klyueva, S.F., Salyuk, P.A. (2015) Heuristic search for the optimal route ship. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. (5). 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-55-62.

УДК 623.98: 534.222: 004.93<sup>1</sup>

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ СИСТЕМЫ КЛАССИФИКАЦИИ МОРСКИХ ЦЕЛЕЙ ПО КРИТЕРИЮ НАДЕЖНОСТИ

**Валерий Александрович Пятакович**

кандидат технических наук, доцент  
начальник научно-исследовательской лаборатории  
Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. адм. С.О. Макарова  
690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6  
тел. +7(914) 662-70-32, e-mail: pva.877com@mail.ru

**Виктория Феликсовна Рычкова**

начальник управления научно-исследовательской  
и инновационной деятельности  
Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел. + 7(908) 993-88-44, e-mail: rychkova@msun.ru

### Аннотация

В работе представлен синтез методов и алгоритмов гарантированного управления эксплуатацией нейросетевой экспертной системы, расчет надежности аппаратуры, используемой в ее структуре для классификации целей при мониторинге морских акваторий. рассмотрены некоторые стратегии гарантированного управления эксплуатацией. Описана общая методика гарантированного управления эксплуатацией элементной базы аппаратуры нейросетевой экспертной системы классификации морских целей. Реализация разрабатываемого комплекса вычислительных операций нейронных сетей на многопроцессорных нейроподобных сверхбольших интегральных схемах в виде нейросетевой экспертной системы для распознавания и классификации измеряемых информационных полей морских объектов системой мониторинга морских акваторий, обеспечит возможность решения многофункциональных задач морской науки и оборонного комплекса государства.

**Ключевые слова:** гарантированное управление эксплуатацией; критерии оптимальности, эффективность функционирования технического объекта, управляющие воздействия, контрольные измерения состояния объекта

## PARAMETRIC OPTIMIZATION OF THE MARINE TARGET NEURAL NETWORK CLASSIFICATION SYSTEM BY RELIABILITY CRITERION

**Valeriy A. Pyatakovich**

associate professor, Cand. Sci. Tech.  
Director of the research laboratory  
Pacific Higher Naval School named Admiral S. Makarov  
6, Kamskiy pereulok, 690062, Vladivostok, Russia  
tel. +7(914) 662-70-32, e-mail: pva.877com@mail.ru

**Victoria F. Rychkova**

Director of the department of Research and innovation activities  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel. + 7(908) 993-88-44, e-mail: rychkova@msun.ru

### Abstract

The paper contains a synthesis of methods and algorithms for guaranteed control over the operation of the neural network expert system, calculation of the reliability of the equipment used in its structure for the classification of targets when monitoring sea water areas. Some strategies of guaranteed operation management are considered. The general technique of guaranteed control over the operation of the hardware elements of the neural network expert system for marine target classification is described. The practical implementation of the system that is developed for executing the computing operations by way of neural network on the multiprocessor neural VLSI circuits in the form of neural network expert system for the identification and classification of measured information fields of sea objects as part of sea waters' monitoring system will provide the ability to solve multi-functional problems of marine science and of the defense industry of the State.

**Key words:** guaranteed operation management; criteria of optimality, efficiency of a technical object, control actions, control measurements of the state of the object

### Введение

Содержание основного этапа гарантированного управления эксплуатацией нейросетевой системы классификации морских целей (НЭС) составляет

задача поиска оптимальной (в минимаксном смысле) стратегии управления  $u^{opt}(\tau, y^*)$ .

Постановка этой задачи, связана с определением последовательности, характера и величины управляющих воздействий на состояние морского

технического объекта (МТО), в частности на элементную базу аппаратуры, нейросетевой экспертной системы классификации морских целей. При этом в зависимости от информационного обеспечения, избранного критерия оптимальности, возможности управления, условий эксплуатации и т.п. в рамках общей постановки рассматриваемой задачи можно выделить ряд частных ее разновидностей.

Так, при использовании разных критериев оптимальности возникают задачи формирования тех или иных стратегий гарантированного управления эксплуатацией МТО [1].

В зависимости от возможностей управления эксплуатацией и наличия информации о закономерностях дрейфа параметров объекта и имеющихся ресурсах (в том числе и вычислительных), среди разновидностей общей задачи формирования  $u(\tau, y^*)$  можно выделить: задачи поиска глобально оптимальных стратегий гарантированного управления эксплуатацией; задачи определения локально-оптимальных стратегий  $u(\tau, y^*)$ ; задачи построения вырожденных стратегий гарантированного управления эксплуатацией.

Приведенные выше задачи не исчерпывают всего многообразия разновидностей задач определения стратегий гарантированного управления эксплуатацией, но отражают основные особенности других таких задач и являются наиболее типичными для практики.

С учетом особенностей минимаксного подхода (отсутствие общих рецептов решения) формальное описание представленных задач целесообразно осуществлять применительно к конкретным условиям.

Вообще говоря, выбор стратегии проведения управляющих воздействий является наиболее важной частью любых задач управления, в том числе и задач гарантированного управления эксплуатацией, поскольку правильный выбор здесь определяет, в конечном счете, достижение (или не достижение) цели управления [1].

Правильность выбора  $u(\tau, y^*)$  не только гарантирует безотказность и сохранение заданного качества эксплуатации МТО, но и существенно увеличивает его эксплуатационный ресурс. При отсутствии управления эксплуатацией любая, даже самая надежная по своей схеме и конструкции система, может стать ненадежной.

В настоящее время разработано немало методик и практических рекомендаций по указанной тематике [3, 5]. К сожалению, использование результатов таких работ для гарантированного управления эксплуатацией редко бывает возможным.

Отсюда вытекает необходимость разработки помимо алгоритмов формирования  $u(\tau, y^*)$  новых методик реализации избранной стратегии. Общая формулировка задач гарантированного управления эксплуатацией еще не позволяет получить их общее решение. Можно только сказать, что они относятся к классу оптимизационных задач, и их решение, как правило, следует искать на основе методов вычислительной математики и численного эксперимента.

### 1. Локально-оптимальные стратегии гарантированного управления эксплуатацией морского технического объекта

Трудности, связанные с нахождением оптимальной минимаксной стратегии гарантированного управления эксплуатацией, часто вынуждают прибегать к определенным упрощениям и вводить аппроксимацию  $u^{opt}(\tau, y^*)$ .

Такой подход является традиционным в теории оптимального управления и часто применяется на практике из-за большей простоты достижения конкретных результатов.

Особенно велико значение этого перехода в условиях априорной неопределенности, когда уместно пойти на некоторые упрощения, без которых найти решение задачи чрезвычайно сложно, либо вообще невозможно [1, 4]. Вышеизложенное касается задачи построения стратегии гарантированного управления эксплуатацией, в которой поиск необходимо осуществлять в условиях, когда предел возможных изменений  $y(t)$  априори не определен, т.е. область  $[b^-(t), b^+(t)]$  не задана. Из-за недостатка априорных сведений при решении задачи:

$$g^* = \min_{u(t) \in U(t)} \max_{b^-(t) \leq y(t) \leq b^+(t)} G(y, u, t),$$

невозможно заранее установить функциональное соответствие между  $y(t)$  и ожидаемыми результатами гарантированного управления эксплуатацией, т.е. априори определить  $u^{opt}(\tau, y^*)$ . Построение области  $[b^-(t), b^+(t)]$  и формирование искомой стратегии  $u^{opt}(\tau, y^*)$  в решаемой задаче требуется осуществлять на основе данных, получаемых в процессе управления эксплуатацией. Найти в такой ситуации глобально оптимальную стратегию управления чрезвычайно трудно.

Для преодоления возникающих здесь трудностей можно аппроксимировать глобально-оптимальную стратегию управления в совокупности локально-оптимальных стратегий. Каждая из локально-оптимальных стратегий для уменьшения ошибки аппроксимации должна быть адаптивной, т.е. обладать способностью к улучшению по мере накопления данных об изменениях  $y(t) \in Y(t)$ .

Рассмотрим задачу поиска адаптивной локально-оптимальной стратегии гарантированного управления эксплуатацией с использованием минимаксного прогноза состояния технического объекта. Пусть управление эксплуатацией МТО состоит в проведении в фиксированные моменты времени  $\{\tau_i\}_{i=0}^p, \tau_i \in T$  контрольных измерений или совмещенных с контролем регулировок  $y(t)$ .

При этом на интервале  $[\tau_0, \tau_k] \in T, k < p$  можно без ущерба нормального функционирования объекта лишь контролировать  $y(t)$ . Другими словами, существует некоторый интервал, где заведомо известно, что регулировки  $y(t)$  не потребуются. Этот интервал  $[\tau_0, \tau_k]$  можно назвать интервалом накопления информации. Далее, пусть относительно ошибки контроля  $e(t)$  известно только, что она лежит в пределах  $[c_1(t), c_2(t)]$ .

Функция потерь  $H(y)$  задана. Затраты на проведение одной регулировки составляют  $\chi$ . Требуется найти такую стратегию управления эксплуатацией, реализация которой обеспечивает

гарантированный минимум эксплуатации потерь на множестве  $T$ .

Поставленная задача может быть выражена как:

$$g^* = \inf_{r \in R} \sup_{B^- \leq A \leq B^+} \left\{ \int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} H(A, r, t) dt + w_i \chi \right\},$$

где  $B^-, B^+$  – параметры функций  $b^-(t)$  и  $b^+(t)$   $b^-(t) \leq y(t) \leq b^+(t)$ ,  $t > \tau_i$ ,  $i \geq k$ .

$$w_i = \begin{cases} 0, & r \notin R, \\ 1, & r \in R, \end{cases} \quad i = \overline{k, p}.$$

Алгоритм решения задачи состоит в следующем [1, 3, 4, 6]:

1. На интервале  $[\tau_0, \tau_k] \in T$  по результатам измерений случайного процесса  $y(t)$  с помощью одного из алгоритмов минимаксного прогноза состояния строятся  $b^-(t)$  и  $b^+(t)$ , т. е. определяются параметры  $B^-$  и  $B^+$ ;

2. Вычисляются  $g^*$  и соответствующие ему  $r$  (+ если  $r \notin R$ , то регулировка  $y(t)$  в момент  $\tau_k$  не проводится);

3. Осуществляется контрольное измерение  $y(t)$  в момент  $\tau_{k+1}$  с помощью одного из алгоритмов минимаксного прогноза состояний уточняются  $B^-$  и  $B^+$ ;

4. Повторяется пункт 2 для момента  $\tau_{k+1}$  (определяется необходимость регулировки  $y(t)$  в момент  $\tau_{k+1}$ );

5. Процедура повторяется, начиная с пункта 3, до тех пор, пока  $\tau_{k+1} \in T$ .

Предложенный алгоритм является однозначным, локально-оптимальным и адаптивным. Эффективность такого алгоритма можно оценить по критерию «жизнеспособности», в качестве которого здесь можно применить отношение значений функционала  $S_T$  на соседних интервалах  $[\tau_{i-1}, \tau_i]$  и  $[\tau_i, \tau_{i+1}]$ .

Другой разновидностью решаемой задачи является задача построения  $u^{opt}(\tau, y^*)$  по критерию гарантированного времени безотказного функционирования следующим образом. Пусть гарантированное управление эксплуатацией состоит в проведении в некоторые моменты времени  $\tau_i \in T, i = 0, 1, \dots$  контрольных измерений и регулировок  $y(t)$  или только контрольных измерений  $y(t)$ . Ошибки контроля лежат в пределах  $[c_1(t), c_2(t)]$ . На интервале  $[\tau_0, \tau_k]$  проводить регулировки  $y(t)$  не требуется. Необходимо определить стратегию управления эксплуатацией, гарантиующую безотказность функционирования МТО при условии, что время между двумя управлениями будет не меньше  $\Delta T$ . При этом, если  $y(t) \in D$ , где  $D$  - заданная область, то объект функционирует нормально.

Сформулированная задача может быть представлена в виде

$$\tau_{i+1}^* = \max_{r \in R} \min_{A=B^-, B^+} \{ \tau: y(A, r, \tau) \notin D \},$$

при  $\tau_{i+1}^* - \tau_i^* \geq \Delta T$ , где  $B^-, B^+$  – параметры функций  $b^-(t)$  и  $b^+(t)$ , (выражения (3.13) (3.14)),  $b^-(t) \leq y(t) \leq b^+(t)$ ,  $t > \tau_i$ ,  $i \geq k$ .

Алгоритм решения этой задачи состоит в следующем:

1. По данным контроля  $y(t)$  на интервале  $[\tau_0, \tau_k]$  определяются параметры  $B^-$  и  $B^+$ ;

2. Вычисляются  $\tau_{k+1}^*$  и величина  $r \in R$  для  $\tau_k$  (если  $r \notin R$ , то регулировка в момент  $\tau_k$  не проводится);

3. Если  $\tau_{k+1}^* - \tau_k \geq \Delta T$ , то осуществляется контрольное измерение  $y(t)$  в момент  $\tau_{k+1}^*$ , с помощью минимаксного прогноза уточняются  $B^-$  и  $B^+$  (при  $\tau_{k+1}^* - \tau_k \leq \Delta T$  формирование  $u^{opt}(\tau, y^*)$  завершается);

4. Повторяется пункт 2 для  $\tau_{k+2}^*$  (если  $r \notin R$ , то регулировка в момент  $\tau_{k+1}^*$  не проводится);

Далее процедура повторяется, начиная с пункта 3, до тех пор, пока  $\tau_{i+1}^* - \tau_i \geq \Delta T$ . [1, 4, 5]

Нетрудно заметить, что представленный алгоритм является однозначным, локально-оптимальным и адаптивным. Эффективность такого алгоритма, как и описанного выше, можно оценить, сравнивая гарантированное время безотказного функционирования объекта без управления эксплуатацией с полученным при применении предложенного алгоритма.

Созданные с использованием такого подхода алгоритмы формирования  $u^{opt}(\tau, y^*)$  достаточно просты в реализации и позволяют в условиях существенной ограниченности и неопределенности исходных данных находить стратегию управления эксплуатацией, гарантирующую безотказность и высокое качество функционирования технического объекта на интервале  $T$ . При этом в ряде ситуаций, в частности, при наличии большого числа ограничений на время проведения, характер и величину управляющих воздействий локально-оптимальная стратегия гарантированного управления эксплуатацией может совпадать с глобально-оптимальной стратегией.

Существует также возможность и аппаратной реализации указанных алгоритмов. Примером технического устройства, позволяющим решать задачу поиска максиминной стратегии управления эксплуатацией может служить устройство для гарантированной экстраполяции линейных процессов.

В зависимости от конкретных условий практически могут быть найдены и другие технические решения для реализации предложенных алгоритмов [1, 4, 5, 8].

## 2. Определение глобально-оптимальных стратегий гарантированного управления

Построение и реализация на практике локально-оптимальной стратегии гарантированного управления эксплуатацией, несмотря на очевидные преимущества в вычислительном аспекте, часто оказываются связанными с неполным использованием имеющегося информационного обеспечения потенциального ресурса технического объекта.

Локальный характер  $u^{opt}(\tau, y^*)$  не позволяет говорить о том, что все возможности по гарантированному управлению эксплуатацией используются полностью и наиболее рациональным образом. Естественно, хотелось бы иметь достаточно общий метод («алгоритм»), который позволял бы находить глобально-оптимальную стратегию гарантированного управления эксплуатацией, т. е. последовательность управляющих воздействий, обеспечивающих безотказность и высокую эффективность функционирования объекта на основе полного

использования всех возможностей управления и исходной информационной базы. В данном разделе предпринята попытка разработки такого метода.

Наиболее общим и естественным критерием оптимальности гарантированного управления эксплуатацией является критерий, имеющий экономическую природу [1, 2]. В конечном счете, мы всегда стремимся так эксплуатировать объект, чтобы суммарный эффект от его использования во время эксплуатации был бы максимальным.

Такие показатели, как гарантированный уровень работоспособности объекта или гарантированное время безотказного функционирования лишь косвенным образом характеризуют этот эффект. Объективно выразить количественное соответствие здесь практически невозможно.

$$g^* = \text{extr } G(y^*, u, t), \quad \{u(\tau, y^*): \tau \in T, y^* \in Y^*, u \in U\}, (1)$$

где  $g^*$  – значение критерия, соответствующее оптимальной стратегии управления эксплуатацией.

Для формирования искомой стратегии  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ , учитывая аддитивность критерия  $S_\Gamma$ , можно применить принцип оптимальности Беллмана [1, 3, 5]. Аддитивность (мультипликативность) критерия оптимальности открывает путь к преобразованию задачи поиска оптимального управления на основе принципа оптимальности Беллмана. Нахождение стратегии  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$  можно рассматривать как многошаговый управляемый процесс принятия решений для синтеза оптимальной системы (управление), где  $S_\Gamma$  – финальная функция потерь (сумма потерь, связанных со всеми шагами принятия решений).

За счет аддитивности  $S_\Gamma$  на основе принципа оптимальности Беллмана может быть достигнута глобально-оптимальная стратегия гарантированного управления эксплуатацией  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$  пошаговой минимизацией критерия  $S_\Gamma$ .

Соответствующие алгоритмы являются аддитивными, так как совместно с принятием основных решений оценивают известную обстановку, чем улучшают процесс принятия решений. Они, как правило, могут быть реализованы в рекуррентном виде [1].

Для составления рекуррентных уравнений решение задачи формирования  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$  необходимо построить пространство состояний [1, 5]. Иначе говоря, необходимо определить совокупность координат, содержащих применительно к задаче (1) все сведения об объекте на данном интервале времени вне зависимости от его прошлого поведения. При этом следует учитывать возможные трансформации задачи (1), обусловленные видом представления прогнозируемых оценок  $y(t)$ . Так, использование алгоритмов гарантированного прогноза дает возможность получать искомые оценки как интервальные (функции  $b^-(t) \leq y(t) \leq b^+(t), t \in T \setminus T_p$ ).

Результат решения задачи прогноза с помощью рекуррентного минимаксного фильтра есть точечная оценка  $y(t), t \in T \setminus T_p$  и т.п.

Соответственно, с учетом возможностей гарантированного прогноза, задача (1) трансформируется в задачу (2).

Более содержательные сведения с этой точки зрения могут быть получены при использовании экономических показателей. Одним из таких показателей является, в частности, показатель гарантированного уровня общих материальных затрат  $S_\Gamma$ .

По величине  $S_\Gamma$  является более общим по сравнению с другими показателями (неэкономического характера) как мера качества функционирования технического объекта на множестве  $T$ .

Отсюда вытекает последовательность его использования в качестве критерия оптимальности при построении общего алгоритма формирования глобально-оптимальной стратегии гарантированного управления эксплуатацией на всем интервале  $T$ , т.е. общего минимаксного алгоритма решения задачи (1).

$$g^* = \min_{u(t) \in U(t)} \max_{b^-(t) \leq y(t) \leq b^+(t)} G(y, u, t), \text{ или}$$

$$g^{**} = \max_{u(t) \in U(t)} \min_{b^-(t) \leq y(t) \leq b^+(t)} G^*(y, u, t), (2)$$

где  $b^-(t)$  и  $b^+(t)$  могут быть найдены по данным контроля  $y(t)$ .

При этом набор  $(B^-, B^+, t)$ , где  $B^+, B^-$  – матрицы, элементы которых задают область возможных вариаций коэффициентов  $a_{ij}$  в модели  $y(t) = A \cdot F(t)$ , ( $A = \|a_{ij}\|_{i=1, j=0}^{n, m}$  – матрица непрерывных детерминированных функций времени) гарантированно описывает на время  $t$  состояние технического объекта вне зависимости от его поведения в прошлом [1].

Информационную характеристику объекта на интервале  $[t, t_c] \in T, t \leq t_c$  можно представить как  $(B^-, B^+, t, t_c)$ . Применительно к решаемой задаче координаты  $B^-, B^+, t, t_c$  содержат все сведения об объекте вне зависимости от его прошлого поведения при  $t, t_c \in T$ , т.е.  $(B^-, B^+, t, t_c)$  можно рассматривать как информационное пространство состояний.

Если в качестве алгоритма прогноза, т.е. алгоритма определения состояния на интервале  $[t, t_c]$ , использовать рекуррентный минимаксный фильтр, то искомое информационное пространство состояний можно представить как набор  $(A^*, t, t_c)$ , где  $A^*$  – матрица минимаксных оценок коэффициентов  $a_{ij}$  модели  $y(t) = A \cdot F(t)$ .

Определение информационного пространства состояний МТО в виде  $(B^-, B^+, t, t_c)$  (или  $(A^*, t, t_c)$ ) дает возможность построить алгоритм решения задачи (2) по критерию гарантированного уровня общих эксплуатационных потерь  $S_\Gamma$  на основе принципа оптимальности Беллмана.

Сначала рассмотрим алгоритм формирования  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$  для информационного пространства состояний вида  $(B^-, B^+, t, t_c)$ .

Пусть функция  $S(B^-, B^+, t, t_c)$  характеризует предельные материальные потери, связанные с эксплуатацией технического объекта в состоянии  $(B^-, B^+, t, t_c)$  при проведении оптимальной стратегии  $u(\tau, y^*)$ .

Управляющие воздействия состоят в контроле и регулировке  $y(t)$ . Математическая модель



регулировки представлена выражением  $y_r^* = y^* + r$ , где  $y_r^*$  – оценка состояния объекта после регулировки;  $y^*$  – оценка  $y(t)$  до регулировки.

Предельные материальные потери при отсутствии управления эксплуатацией на интервале  $[t, t_c]$  для состояния  $(B^-, B^+, t, t_c)$  можно представить в виде

$$S_1(B^-, B^+, t, t_c) = \sup_{B^- \leq A \leq B^+} \int_t^{t_c} H(y, \tau) d\tau, \quad (3)$$

где  $H(y, \tau)$  – функция потерь.

$$S_2(B^-, B^+, t, t_c) = \{S_1(B^-, B^+, t, \tilde{t}) + \mu + S(\tilde{B}^-, \tilde{B}^+, \tilde{t}, t_c)\} \quad (4)$$

Если в момент времени  $\tilde{t}, t \leq \tilde{t} \leq t_c$  осуществляется регулировка  $y(t)$  (измерение  $y(t)$  на  $r \in R$ ), затраты на проведение которой составляют  $k$ , то предельные материальные потери для

$$S_3(B^-, B^+, t, t_c) = \{S_1(B^-, B^+, t, \tilde{t}) + k + S(B_r^-, B_r^+, \tilde{t}, t_c)\} \quad (5)$$

где  $B_r^-, B_r^+$  – матрицы предельных значений коэффициентов  $a_{ij}$  с учетом изменения состояния технического объекта после регулировки.

Исходя из полученных зависимостей (3), (4), (5) можно сформировать на основе принципа оптимальности Беллмана рекуррентные уравнения

$$S_2 = \inf_{t \leq \tilde{t} \leq t_c} \left\{ S_1(B^-, B^+, t, \tilde{t}) + \mu + \inf_{B^-, B^+} S(\tilde{B}^-, \tilde{B}^+, \tilde{t}, t_c) \right\} \quad (8)$$

$$S_3 = \inf_{t \leq \tilde{t} \leq t_c} \left\{ S_1(B^-, B^+, t, \tilde{t}) + k + \inf_{r \in R} S(B_r^-, B_r^+, \tilde{t}, t_c) \right\} \quad (9)$$

Значения  $i$ , на которых достигается минимум в (6), и значения  $r$ , на которых достигается общий минимум в (8) и (9), являются функциями  $(B^-, B^+, t, t_c)$  и описывают искомую оптимальную в смысле критерия  $S_\Gamma$  стратегию гарантированного управления эксплуатацией  $u(\tau, y)$ .

В приведенных соотношениях фигурируют параметры  $B^-, B^+$ , получение которых связано с использованием определенной прогнозирующей процедуры. В качестве такой процедуры может служить один из алгоритмов реализации метода гарантированного прогноза. Решение уравнений (6), (7), (8), (9) по существу является задачей динамического программирования. При этом для формирования  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$  важнее определить характер и время проведения управляющих воздействий, чем точные числовые значения  $S(B^-, B^+, t, t_c)$ , обращающие в минимум уравнения (6), (7), (8), (9). Поэтому целесообразно для решения полученных уравнений воспользоваться методом приближений в пространстве политик (стратегий) [1, 5].

Рассмотрим стратегию управления, которая не содержит ни одного измерения или регулировки. Предельные материальные потери при такой стратегии составляют

$$S^{(0)}(B^-, B^+, t, t_c) = S_1(B^-, B^+, t, t_c)$$

Далее рассмотрим стратегию, содержащую не более одного измерения или регулировки [1]. Предельное значение материальных затрат при этой

Если в момент времени  $\tilde{t}, t \leq \tilde{t} \leq t_c$  произведено измерение  $y(t)$ , связанное с затратами  $\mu$ , и получено значение  $z(t) = y(t) + e(t)$  ( $e(t)$  – случайная ошибка измерения, стохастические свойства которой не определены, а задана лишь область ее возможных вариаций), то информационное состояние объекта будет  $(\tilde{B}^-, \tilde{B}^+, \tilde{t}, t_c)$ , где  $\tilde{B}^-, \tilde{B}^+$  – матрицы предельных значений коэффициентов  $a_{ij}$ , полученные по результатам проведенного измерения. При этом предельные материальные потери, связанные с эксплуатацией объекта, составляет:

информационного состояния  $(B^-, B^+, t, t_c)$  можно описать как:

для нахождения оптимальной стратегии управления эксплуатацией  $u(\tau, y^*)$  по критерию  $S_\Gamma$

$$(B^-, B^+, t, t_c) = \inf_{i=1,2,3} (S_i) \quad (6)$$

$$S_1 = S(B^-, B^+, t, t_c) \quad (7)$$

стратегии получается, как результат подстановки функции в правую часть уравнения (6) или

$$S \equiv S^{(0)}(B^-, B^+, t, t_c), \quad S^{(1)}(B^-, B^+, t, t_c) \leq S^{(0)}(B^-, B^+, t, t_c).$$

Вообще, при рассмотрении стратегий управления эксплуатацией  $u(\tau, y^*)$ , содержащих не более  $\chi$  вмешательств, предельные материальные потери  $S^{(\chi)}(B^-, B^+, t, t_c)$ , можно вычислить при подстановке  $S^{(\chi-1)}(B^-, B^+, t, t_c)$  в правую часть выражения (6). Причем

$$0 \leq S^{(N)}(B^-, B^+, t, t_c) \leq S^{(\chi-1)}(B^-, B^+, t, t_c), N = 1, 2, \dots$$

Следовательно,

$$\exists \lim_{N \rightarrow \infty} S^{(N)}(B^-, B^+, t, t_c) = S^{(\infty)}(B^-, B^+, t, t_c) \geq 0,$$

где  $S^{(\infty)}(B^-, B^+, t, t_c)$  является решением уравнений (6).

Использование идей метода приближений в пространстве стратегий дает возможность построить по уравнениям (6), (7), (8), (9) таблицу оптимальных в смысле критерия  $S_\Gamma$  управляющих воздействий, определяемых набором  $(B^-, B^+, t, t_c)$ . На основании этой таблицы и в зависимости от результатов управления можно сформировать адаптивную стратегию  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ . Алгоритм поиска  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$  при этом состоит в следующем:

1. По данным априори функции потерь  $H(y)$  и наборам  $(B^-, B^+, t, t_c)$  находится путем решения

уравнений (7) начальное приближение  $S^{(1)}(B^-, B^+, t, t_c)$ .

2. Путем решения уравнений (6), (8) и (9) находится следующее приближение  $S^{(2)}(B^-, B^+, t, t_c)$ .

3. Путем решения уравнений (6), (7), (8) и (9) определяется новое приближение  $S^{(2)}(B^-, B^+, t, t_c)$ .

4. Процедура повторяется, начиная с пункта 3, до тех пор, пока

$$S^{(\chi)}(B^-, B^+, t, t_c) \leq S^{(\chi-1)}(B^-, B^+, t, t_c), \chi = 2, 3, 4, \dots$$

5. С помощью  $S^{(\chi)}(B^-, B^+, t, t_c)$  строится таблица оптимальных управляющих воздействий, определяемых  $(B^-, B^+, t, t_c)$ .

6. По полученной таблице для данного набора  $(B^-, B^+, t, t_c)$  находятся характеристики первого управляющего воздействия на интервале эксплуатации  $T$ , т.е. начинается формирование  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ .

7. По полученной таблице определяются характеристики следующего управления эксплуатацией объекта для нового информационного состояния, наступившего после проведения очередного управляющего воздействия.

8. Процесс повторяется, начиная с пункта 7, до конца эксплуатации технического объекта, т.е. до завершения формирования стратегии  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ .

Основное содержание изложенного алгоритма составляет построение таблицы оптимальных профилактических воздействий, определяемых набором  $(B^-, B^+, t, t_c)$ . По существу эта таблица есть непосредственный результат решения уравнений (6), (7), (8) и (9) путем приближений в пространстве стратегий и поэтому ее построение в вычислительном аспекте поиска  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$  представляет наибольший интерес. Как известно, основным недостатком методов динамического программирования является высокая трудоемкость вычислений («проклятье размерности» по словам Р. Беллмана). Этот недостаток накладывает известные ограничения на класс ЭВМ, пригодных для решения уравнений (6), (7), (8) и (9). Вместе с тем, существует достаточно простой и эффективный прием, позволяющий уменьшить размерность

$$S(B^-, B^+, t, t_c) = \inf_{i=1,2} (S_i), S_1 = S(B^-, B^+, t, t_c)$$

$$S_2 = \inf_{t \leq \tilde{t} \leq t_c} \left\{ S_1(B^-, B^+, t, \tilde{t}) + k + \mu + \inf_{r \in R} \inf_{B^-, B^+} S(\tilde{B}_r^-, \tilde{B}_r^+, \tilde{t}, t_c) \right\},$$

где  $\tilde{B}_r^-, \tilde{B}_r^+$  – матрицы предельных коэффициентов  $a_{ij}$ .

Если допустимыми управляющими воздействиями являются контрольные измерения или совмещенные с контролем регулировки, то

$$S(B^-, B^+, t, t_c) = \inf_{i=1,2,3} (S_i), S_1 = S(B^-, B^+, t, t_c) \quad S_2 = \inf_{t \leq \tilde{t} \leq t_c} \left\{ S_1(B^-, B^+, t, \tilde{t}) + \mu + \inf_{B^-, B^+} S(\tilde{B}^-, \tilde{B}^+, \tilde{t}, t_c) \right\},$$

$$S_3 = \inf_{t \leq \tilde{t} \leq t_c} \left\{ S_1(B^-, B^+, t, \tilde{t}) + \mu + \omega k + \inf_{r \in R} \inf_{B^-, B^+} S(\tilde{B}_r^-, \tilde{B}_r^+, \tilde{t}, t_c) \right\}, \text{ где } \omega = \begin{cases} 1, & r(\tilde{t}) \in R, \\ 0, & r(\tilde{t}) \notin R. \end{cases}$$

Нетрудно заметить, что приведение в соответствие с условиями управления эксплуатацией уравнений (6), (7), (8) и (9) не вносит принципиальных изменений в описанный ранее

рассматриваемой задачи. Это линейная интерполяция. За счет линейной интерполяции при формировании  $S(B^-, B^+, t, t_c)$  можно без существенного ущерба для точности ограничить число рассматриваемых точек области определения аргументов  $B^-, B^+, t, t_c$ . (Использование линейной интерполяции при построении  $S(B^-, B^+, t, t_c)$  означает, что указанная функция точно вычисляется только при некоторых значениях ее аргументов, остальные значения  $S(B^-, B^+, t, t_c)$  находятся с помощью линейной интерполяции). Размерность рассматриваемой задачи можно уменьшать только за счет введения в алгоритм поиска  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$  процедуры пересчета таблицы оптимальных управляющих воздействий по мере поступления данных контроля  $y(t)$ . Сущность такой процедуры состоит в том, чтобы на каждом шаге формирования  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$  сужать область определения аргументов функции  $S(B^-, B^+, t, t_c)$  в соответствии с данными контроля  $y(t)$ . Таким образом, не снижая точность расчета, можно по мере формирования искомого стратегии  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$  ограничивать число наборов  $(B^-, B^+, t, t_c)$ , участвующих в вычислении  $S(B^-, B^+, t, t_c)$ . Организация рассматриваемой процедуры не вызывает затруднений и может быть осуществлена по описанной выше схеме расчета таблицы оптимальных профилактик.

В зависимости от имеющихся ограничений на управление эксплуатацией технического объекта (списания множества управляющих воздействий  $V$ ) соотношения (6), (7), (8) и (9) могут быть преобразованы. Так, например, если  $V \equiv R$  (управление эксплуатацией состоит только в регулировках  $y(t)$ ), то уравнения для нахождения  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$  приобретают вид:

$$S(B^-, B^+, t, t_c) = \inf_{i=1,2} (S_i), S_1 = S(B^-, B^+, t, t_c)$$

$$S_2 = \inf_{t \leq \tilde{t} \leq t_c} \left\{ S_1(B^-, B^+, t, \tilde{t}) + k + \inf_{r \in R} S(B_r^-, B_r^+, \tilde{t}, t_c) \right\}$$

Если при управлении эксплуатацией контрольные измерения и регулировки  $y(t)$  совмещены, то искомую стратегию  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$  можно определить как результат решения уравнений

уравнения для нахождения могут быть представлены как:

алгоритм их решения. Поэтому нет необходимости в его дополнительном рассмотрении.

В условиях существенной ограниченности и неопределенности исходной совокупности сведений уравнения или их модификации могут служить

основой для решения задач поиска. При этом алгоритм формирования искомой стратегии гарантированного управления эксплуатацией МТО ограничивается достаточной общностью [1, 4].

Следуя данному алгоритму, можно строить гарантированную стратегию управления эксплуатацией как контролируемых, так и неконтролируемых технических объектов при управлении случайным процессом деградации параметров  $y(t)$  в форме отличной от избранной или при применении минимаксных алгоритмов прогноза не относящихся к алгоритмам реализации метода гарантированного прогноза достаточно только соответствующим образом описать информационное пространство состояний, чтобы уравнения (6), (7), (8), (9) или их модификации были бы пригодны для формирования  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ . В этом смысле использование марковской аппроксимации  $y(t)$  приводит к тривиальному случаю: требуемое описание непосредственно представлено в виде самой модели  $y(t)$ . Изменение условий оптимальности выбора  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$  также не нарушает общности предложенного алгоритма.

Соответствующее задание функции потерь позволяет здесь переходить от одного критерия оптимальности в другому.

В качестве примера использования уравнений вида (6), (7), (8), (9) для нахождения  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$  при представлении информационного пространства состояний в форме отличной от  $(B^-, B^+, t, t_c)$ , можно привести уравнения, определяющие  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$  в зависимости от набора  $(A^*, t, t_c)$ . Как отмечалось выше указанный набор составляет информационное пространство состояний объекта, обусловленное применением для прогнозирования состояния минимаксных алгоритмов. Данные уравнения могут быть записаны как

$$S(A^*, t, t_c) = \inf_{i=1,2,3} \quad (10)$$

$$S_1 = S(A^*, t, t_c) \quad (11)$$

$$S_2 = \inf_{t \leq \tilde{t} \leq t_c} \left\{ S_1(A^*, t, \tilde{t}) + \mu + \inf_{A^*} S(A^*, \tilde{t}, t_c) \right\} \quad (12)$$

$$S_3 = \inf_{t \leq \tilde{t} \leq t_c} \left\{ S_1(A^*, t, \tilde{t}) + k + \inf_{r \in R} S(A^*, \tilde{t}, t_c) \right\} \quad (13)$$

Также, как и управления (6), (7), (8), (9), соотношения (10), (11), (12), (13) могут быть преобразованы для приведения в соответствие с имеющимися ограничениями на управление. Решение уравнений (10), (11), (12), (13) несложно получить с помощью алгоритма формирования таблицы оптимальных управляющих воздействий, описанного выше. Следует отметить, что применение рассмотренного алгоритма не требует на практике постоянного обращения при формировании  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$  к ЭВМ, мощность которой достаточна для расчета таблицы оптимальных управляющих воздействий.

### 3. Общая методика гарантированного управления эксплуатацией элементной базы аппаратуры, нейросетевой системы классификации морских целей

На основе решения частных задач определения  $u^{opt}(\tau, y^*)$  можно составить общую методику расчета наиболее целесообразных вариантов стратегий управления, исходя из реальных возможностей управления эксплуатацией и информационного обеспечения технических объектов. Данная методика устанавливает порядок расчета проведения воздействий по управлению эксплуатацией и состоит в следующем.

1. Набор алгоритмов позволяет находить математическую модель прогнозируемого процесса в ситуациях, когда неизвестны стохастические характеристики возмущающих факторов, относительно ошибок измерения здесь обычно бывает заданы только границы их возможных вариаций. Структура модели  $y(t)$  является известной и удовлетворяющей требованию адекватности, как правило, это  $y(t) = A \cdot F$ , где  $F = \{f_i(t)\}_{i=0}^n$  – набор детерминированных функций времени,  $A$  – матрица случайных (неопределенных) коэффициентов. Данное представление можно рассматривать как разложение случайного процесса по детерминированному базису. Иначе говоря, любой случайный процесс может быть описан таким образом [1, 4]. При этом ошибки модели, которые нельзя рассматривать как случайные [5], здесь могут быть учтены.

2. Определение модели прогнозируемого процесса  $y(t)$  позволяет перейти к решению задач первого уровня гарантированного управления эксплуатацией. Суть таких задач состоит в определении критерия оптимальности управления. Наиболее пригодными являются показатели гарантированного уровня эксплуатационных потерь и гарантированного времени безотказной работы. В условиях ограничений стратегия гарантированного управления эксплуатацией может быть вырожденной [1]. Вырожденность стратегии гарантированного управления эксплуатацией предполагает однократную и первоначальную установку параметров технического объекта на уровень, необходимый для обеспечения безотказности и высокой эффективности функционирования на интервале  $T$ . Естественно, что здесь в исходных данных не фигурируют наблюдения  $y(t)$ . Информационная база для построения вырожденной стратегии гарантированного управления эксплуатацией содержит только априорные сведения относительно  $y(t)$ . Такие сведения практически всегда могут быть даны в виде ограничений на прогнозируемый процесс, в частности, так  $y(t) \in D$ ,  $\forall t \in T$ , где  $D$  – область работоспособных состояний.

3. Определение критерия оптимальности для гарантированного управления эксплуатацией завершает решение задач первого уровня общей проблемы управления эксплуатацией технических объектов. Следующий уровень возникающих здесь задач связан с построением информационной базы для управления. Такая база может быть построена с применением алгоритмов обработки данных наблюдений за состоянием объектов для прогнозирования изменения их состояния.

Следует отметить, что применение статистических методов обработки наблюдений для прогнозирования состояния в данной ситуации является неправомерным [1-4]. Расчет на «наихудший» случай здесь позволяет находить решение, адекватное решениям информационного обеспечения, т.е. получать оценки  $y(t), t \in T \setminus T_p$  только на основе имеющихся данных без всякого их домысливания или интерпретации.

В зависимости от возможностей управления и требований к виду представляемых результатов прогноза состоянием МТО можно выбрать один из пяти алгоритмов минимаксного прогнозирования  $y(t), t \in T \setminus T_p$ .

4. Третий уровень задач гарантированного управления эксплуатацией МТО состоит в определении, собственно, наиболее рациональной стратегии управления, т.е. в построении  $u_g^{opt}(\tau, y^*)$ . Такая стратегия (оптимальная в минимаксном смысле) при условии успешного решения задач предыдущих уровней (определение модели  $y(t)$ , выбор критерия оптимальности) может быть найдена по алгоритмам. При этом в зависимости от возможностей управления и имеющейся вычислительной техники можно строить локально-оптимальную или глобально-оптимальную стратегию  $u(\tau, y^*)$ .

Эксплуатация элементной базы МТО с низкими характеристиками надежности приводит обычно к значительным потерям и существенно снижает эффективность их использования. Однако сами по себе высокие характеристики надежности еще не гарантируют столь же высокой эффективности. В связи с этим обстоятельством возникает необходимость разработки научно обоснованной стратегии эксплуатации или технического обслуживания. Естественным выглядит стремление обеспечить оптимальную стратегию эксплуатации, позволяющую повысить эффективность за счет рациональной организации технического обслуживания [3, 4].

Стратегия эксплуатации строится с учетом объективных характеристик надежности (безотказности и ремонтпригодности), особенностей исследуемой системы (например, характера возникновения отказов, наличия средств контроля работоспособности, структуры системы) и условий эксплуатации (климатических условий, наличия средств предотвращения и ликвидации отказов, ограничений на моменты проведения контрольных, диагностических и восстановительных работ и т.п.). Как и при решении любой оптимизационной задачи для синтеза стратегии эксплуатации необходим соответствующий критерий оптимальности.

Следовательно, должен быть задан количественный показатель (критерий), по которому

можно судить о качестве выбранной стратегии технического обслуживания и функционирования исследуемой системы. Как было показано выше, в качестве такого показателя принимается функционал, определенный на множестве возможных траекторий (реализаций) случайного процесса, описывающего изменение состояний системы во времени. Таким образом, рассмотренная в работе задача идентична задаче оптимального управления некоторым случайным процессом, когда: задается случайный процесс изменения состояния системы; множество возможных решений; функционал, определенный на множестве траекторий исследуемого процесса и требуется определить оптимальную стратегию управления [1, 5].

### Заключение

Особенность исследуемых нами задач состоит в том, что они решаются в условиях неполной и не всегда достоверной информации, управления ищутся на основе прогноза, а результат управления должен быть гарантирован. В этих условиях нельзя ориентироваться на некоторое усредненное поведение объекта, на какого-то «среднего представителя» из возможного множества функций распределения, а следует учитывать наихудшие варианты. Возникает конфликтная ситуация, характерная для теории игр при игре с «природой» или «вездесущим и всезнающим противником». Приходится предполагать, что противник знает нашу стратегию и свою стратегию, в этих условиях, выбирает как наихудшую для нас (наилучшую для себя). Для решения задачи выбора оптимальной стратегии управления в указанной ситуации используется принцип максимина (минимакса), гарантирующий получение положительного результата даже в самых неблагоприятных условиях [1]. Естественно, что в более благоприятных условиях найденная таким образом стратегия будет достаточно пессимистической. Поэтому полученные нами результаты полезны, прежде всего, при синтезе стратегии эксплуатации сложных морских технических объектов, а именно НЭС. Специфика НЭС такова [4, 6-8], что основной задачей систем контроля и диагностирования ставится здесь не выявление и локализация отказов, а их предотвращение. Отметим, что методология решения задач индивидуального прогнозирования и планирования эксплуатации по состоянию будет, на наш взгляд, полезной и при решении задач управления эксплуатацией НЭС. При большей информационной обеспеченности, а также не катастрофических последствиях отказов появляется возможность синтеза менее пессимистической, чем минимаксная, стратегии эксплуатации, например, робастной.

### Литература

1. Абрамов О.В., Розенбаум А.Н. Управление эксплуатацией систем ответственного назначения. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 200 с.
2. Андрихин А.В., Пятакович В.А. Экономическая целесообразность замены корабельного оборудования // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза: ПГУ, 2007. – Т. 2. – С. 203–204.
3. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных систем. М.: Наука, 1972. – 336 с.
4. Пятакович В.А., Василенко А.М., Хотинский О.В. Нейросетевые технологии в интеллектуальных системах обнаружения и оперативной идентификации морских целей: монография. – Владивосток: Морской гос. ун-т им. Г. И. Невельского, 2018. – 263 с.

5. Розенбаум А.Н., Дорофеев А.И., Кислова И.И. Прогнозирование состояния при управлении эксплуатацией. – Владивосток: ДВГТУ, 1995. – 134 с.
6. Пятакович В.А., Василенко А.М., Мироненко М.В. Технологии нелинейной просветной гидроакустики и нейро-нечетких операций в задачах распознавания морских объектов: монография. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016 190 с.
7. Пятакович В.А., Василенко А.М., Рычкова В.Ф. Интеллектуальная система нейросетевой классификации морских целей // Морские интеллектуальные технологии. – СПб.: 2018. № 2 (40) Том 2. С. 115–120.
8. Пятакович В.А., Василенко А.М., Рычкова В.Ф. Способ классификации подводных технических объектов экспертной интеллектуальной системой с приемной параметрической антенной // Морские интеллектуальные технологии. – СПб.: 2018. № 2 (40) Том 2. С. 121–126.

#### References

1. Abramov O.V., Rozenbaum A.N. Upravlenie e`kspluataciej sistem otvetstvennogo naznacheniya. – Vladivostok: Dal`nauka, 2000. – 200 s.
2. Andryuxin A.V., Pyatakovich V.A. E`konomicheskaya celesoobraznost` zameny` korabel`nogo oborudovaniya // Trudy` mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost` i kachestvo». – Penza: PGU, 2007. – Т. 2. – С. 203–204.
3. Druzhinin G.V. Nadezhnost` avtomatizirovanny`x sistem. M.: Nauka, 1972. – 336 s.
4. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Xotinskij O.V. Nejrosetevy`e texnologii v intellektual`ny`x sistemax obnaruzheniya i operativnoj identifikacii morskix celej: monografiya. – Vladivostok: Morskoj gos. un-t im. G. I. Nevel`skogo, 2018. – 263 s.
5. Rozenbaum A.N., Dorofeev A.I., Kislova I.I. Prognozirovanie sostoyaniya pri upravlenii e`kspluataciej. – Vladivostok: DVG TU, 1995. – 134 s.
6. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Mironenko M.V. Texnologii nelinejnoj prosvetnoj gidroakustiki i nejro-nechetkix operacij v zadachax raspoznavaniya morskix ob`ektov: monografiya. Vladivostok: Dal`nevost. federal. un-t, 2016 190 s
7. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Ry`chkova V.F. Intellektual`naya sistema nejrosetevoj klassifikacii morskix celej // Morskie intellektual`ny`e texnologii. – SPb.: 2018. № 2 (40) Том 2. С. 115–120.
8. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Ry`chkova V.F. Sposob klassifikacii podvodny`x texnicheskix ob`ektov e`kspertnoj intellektual`noj sistemoj s priemnoj parametricheskoj antennoj // Morskie intellektual`ny`e texnologii. – SPb.: 2018. № 2 (40) Том 2. С. 121–126.

УДК 629.058.45:681.883.48

## ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЁМОИЗЛУЧАЮЩЕГО ТРАКТА КОРРЕЛЯЦИОННОГО ЛАГА

**Виктор Валентинович Завьялов**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Технические средства судовождения  
Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел. +7 (912) 505 22-02, e-mail: zavyalov@msun.ru

**Виктор Александрович Агапов**

адъюнкт кафедры кораблевождения  
Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. адм. С.О. Макарова  
690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6  
тел. + 7(964) 435-51-24, e-mail: victoragapov@mail.ru

**Алексей Ринатович Мансуров**

адъюнкт кафедры технических средств кораблевождения  
Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. С.О. Макарова  
690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6  
тел. +7(924) 241-51-26, e-mail: nusy333.aaa@yandex.ru

### Аннотация

Целью работы является задача обоснования основных технико-эксплуатационных характеристик гидроакустического корреляционного лага. Показаны задачи, решаемые с использованием корреляционных лагов. Произведён анализ основных характеристик некоторых известных моделей корреляционных лагов. Исходя из этого, произведены расчеты и выбор величин рабочей глубины под антенной и частоты излучаемых колебаний. На основе корреляционного способа измерения модуля полной скорости судна, обоснованы величины измерительной базы гидроакустической антенны лага и эквивалентной ширины характеристики направленности антенны. Для подтверждения работоспособности проектируемого корреляционного лага сформировано два сдвинутых случайных процесса с характеристиками идентичными принятым эхосигналам от дна. Приводятся корреляционные и спектральные характеристики сформированных процессов. Приведена схема моделирования измерителя продольной скорости судна. Получены динамические характеристики переходного процесса работы вычислительного устройства лага, дисперсии входного и выходного сигналов схемы слежения.

**Ключевые слова:** судно, измеритель скорости, корреляция, лаг, эхосигнал, рабочая глубина, частота излучения, ширина характеристики направленности антенны, случайный процесс, дисперсия, погрешность измерения скорости

## JUSTIFICATION OF THE MAIN CHARACTERISTICS OF RECEIVER- TRANSMITTER TRACT CORRELATION LAG

**Viktor V. Zavyalov**

professor, Dr.Sci.Tech.

Professor of Department of Technical Aids to Navigation  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel. +7 (912) 505 22-02, e-mail: zavyalov@msun.ru

**Viktor A. Agapov**

post-graduate student of department of Technical aids to navigation  
Pacific Higher Naval School named Admiral S. Makarov  
6, Kamskiy pereulok, 690062, Vladivostok, Russia  
tel. + 7(964) 435-51-24, e-mail: victoragapov@mail.ru

**Aleksey R. Mansurov**

post-graduate student of department of Technical aids to navigation  
Pacific Higher Naval School named Admiral S. Makarov  
6, Kamskiy pereulok, 690062, Vladivostok, Russia  
tel. +7(924) 241-51-26, e-mail: nusy333.aaa@yandex.ru

### Abstract

The aim of the work is to substantiate the basic technical and operational characteristics of the acoustic correlation log. The problems solved with the use of correlation logs are shown. The analysis of the main characteristics of certain known models of correlation lags has been carried out. Based on this, the calculations and the choice of the working depth under the antenna and the frequency of the radiated oscillations are made. Based on the correlation method for measuring the ship's full-speed module, the values of the measuring base of the hydro-acoustic log antenna and the equivalent width of the antenna



directivity characteristics are justified. To confirm the functionality of the projected correlation log, two shifted random processes are formed with characteristics identical to the received echoes from the bottom. Correlation and spectral characteristics of the generated processes are given. A scheme for simulating the ship's longitudinal velocity meter is given. Dynamic characteristics of the transient process of the log computing device, the dispersion of the input and output signals of the tracking circuit, are obtained.

**Key words:** ship, speed meter, correlation, echo, log, working depth, frequency of radiation, directional antenna width, random process, dispersion, speed measurement error

### Введение

Совершенствование методов и морских средств навигации является одной из актуальных задач в решении проблем судоководства.

Наряду с такими известными морскими средствами навигации как доплеровские гидроакустические лаги в настоящее время уделяется большое внимание и гидроакустическим корреляционным лагам (КЛ). Корреляционные методы обработки сигналов находят широкое применение при создании и совершенствовании технических средств навигации, куда входят системы определения места судна, радиолокационные станции и другие системы.

Наиболее совершенным и перспективным измерителем скорости судна является корреляционный измеритель, предназначенный для решения таких навигационных задач, как определение места судна при плавании по счислению, постановку на якорь, швартовку и коррекцию показаний других технических средств навигации.

Этот лаг представляет собой измерительную систему, в которой скорость судна определяется путем анализа корреляционной связи между случайными сигналами, принятыми на движущемся судне приемными элементами, установленными параллельно диаметральной плоскости судна.

Методика обоснования основных характеристик таких лагов в отечественной и доступной зарубежной литературе не освещён.

### 1. Постановка задачи

Современные модели гидроакустических абсолютных КЛ, «Quo Vadis», «MX-810», а также линейка лагов «SAL-T(1-3)» с рабочей глубиной  $H=300$  метров под антенной и другие [1-8] – наряду с информацией об абсолютной (относительной) скорости судна позволяют одновременно получать информацию и о глубине под килем. В этих моделях реализуется корреляционный способ обработки амплитуд огибающих эхосигналов (АОЭС), принятых, как минимум, на две приемные антенны.

Анализ характеристик основных абсолютных КЛ позволяет сделать вывод о том, что эти лаги подразделяются на лаги для гражданского флота и лаги для использования при выполнении специальных научно-исследовательских задач.

При этом для второго класса задач лаги отличаются в основном большой рабочей глубиной под антенной в режиме измерения абсолютной скорости и повышенной точностью измерения скорости.

Целью работы является обоснование основных характеристик гидроакустического абсолютного КЛ, предназначенного для транспортного флота, таких как рабочая глубина под антенной, частота

излучаемых колебаний антенной, некоторые конструктивные параметры приемоизлучающей антенной системы, величины флуктуационной погрешности, возможные алгоритмы работы вычислительных устройств и некоторые динамические характеристики лага.

### 2. Обоснования основных характеристик корреляционного лага

Основной характеристикой любого гидроакустического прибора является его дальность действия. В случае эхолота или КЛ этой характеристикой будет рабочая глубина под антенной в режиме измерения абсолютной скорости, т.е. относительно дна. В начале 1970-х годов для судов гражданских ведомств эта глубина была определена на основе изучения величины глубин на основных судоходных путях мира и составила от 400 до 500 метров [9]. Ряд доплеровских лагов имеют рабочую глубину на уровне 400 метров [1, 2]. На основании этих данных принимаем величину рабочей глубины КЛ 400 метров.

Для обеспечения работы при такой глубине необходимо определиться с величинами частоты излучения несущих колебаний и ширины характеристики направленности антенны на излучение.

Частоту излучаемых колебаний определим, исходя из рекомендаций, изложенных в двух основополагающих работах по техническим характеристикам гидроакустических навигационных приборов [2, 10]:

– для частот излучаемых колебаний от 50 до 200 кГц [2]

$$f_0 = \left[ 2,5 - \left( 6,25 - \frac{A_1}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \right] 10^2, \quad (1)$$

где параметр  $A_1=1,8$  с энергетической точки зрения, для диапазонов глубин  $H=250-700$  метров и импульсного режима излучения со скважностью 2-3; расчёты показывают, что для выбранной глубины  $f_0 = 118$  кГц;

– для частот излучаемых колебаний свыше 60 кГц [10]

$$f_0 = 10 \left( \sqrt{117 + \frac{41,5}{H}} - 3,4 \right), \quad (2)$$

при  $H=400$  метров и импульсного режима излучения со скважностью 2-3  $f_0=114,6$  кГц, для  $H=300$  метров  $f_0=126$  кГц.

С учётом величины частот излучаемых колебаний промышленных корреляционных лагов типа «SAL-T» [3] для рабочей глубины  $H=300$  метров равной 150 кГц принимаем  $f_0 = 120$  кГц.

Ширина характеристики направленности антенной системы выбирается из ряда достаточно противоречивых факторов [1–4].

Необходимо обеспечить работу КЛ и интерполяционного гидроакустического лага при работе с единой антенной системой.

Основным при этом следует считать взаимно автокорреляционный способ измерения модуля полной скорости судна, при этом точка слежения вычислительного устройства должна находиться на определенном уровне нормированной функции взаимной корреляции при нулевом временном сдвиге ( $\rho_{xy}(0) \geq 0,2$ ) принятых эхосигналов, чтобы уровень нормированной функции автокорреляции был приемлем для сохранения точности КЛ.

Другими словами, минимальная длина пространственной волны в спектре частот эхосигналов должна быть больше расстояния между центрами приемных антенн.

Выражение для расчета ширины характеристики направленности на уровне 0,5 по интенсивности по заданным величинам:  $f_0$ ,  $X$  и заданному уровню нормированной функции взаимной корреляции при нулевом временном сдвиге  $\rho_{xy}(0) \geq 0,2$ , имеет вид [4]

$$\Delta_{0,5} = \frac{1,06 \lambda \sqrt{2\pi |\ln \rho_{xy}(0)|}}{\sqrt{4\pi^2 X^2 - k_h^2 \lambda^2 |\ln \rho_{xy}(0)|}}, \quad (3)$$

где  $\Delta$  – эффективная ширина характеристики направленности антенны;  $\lambda$  – длина волны излучаемых колебаний;  $X$  – половина расстояния между центрами приемных гидроакустических преобразователей (ПГАП);  $k_h$  – коэффициент отражения, характеризующий рассеянную (некогерентную) компоненту, создаваемую объектом локации (для грунта это неровности рельефа).

Величину базы антенной системы КГАЛ выберем из анализа размеров излучающих преобразователей лага «SAL-865» (SAL-T3) [3].

Диаметры излучающих и принимающих элементов равны 0,03 м при частоте излучения 150 кГц. Расстояние между центрами элементов равно 0,035 м. Измерительная база этих лагов  $X = (\text{«диаметр преобразователя»} + \text{«зазор между преобразователями»})/2$  равна 0,0175 м.

Методика расчета параметров антенной систем лага с линейной базой направленных приемников достаточно хорошо также описана в работе [4].

Таким образом, на основе вышесказанного можно определить следующие основные параметры антенной системы: диаметры гидроакустических преобразователей  $d=0,03$  м,  $\lambda=0,0125$  м,  $X=0,018125$  м,  $\rho_{xy}(0)=0,2$  и  $k_h=0$ , используя выражение (3), получим  $\Delta_{0,5}=0,37$  рад =  $21,2^\circ$ , что достаточно хорошо согласуется с параметрами лага «SAL-T3» и результатами экспериментальных данных проверки, изложенных в работе [4], макетного образца корреляционного измерителя скорости судна с рабочей частотой 210 кГц и базой  $X=0,0175$  м.

Результаты расчётов корреляционных функций сигналов с характеристиками антенной системы:  $f_0 = 120$  кГц,  $\lambda=0,125$  м,  $k_h=0$ ,  $X=0,018125$  м,  $\Delta_s=0,33$  рад =  $19^\circ$ ,  $V=5,14$  м/с,  $C=0^\circ$  по известным выражениям (4) и (5) нормированной функции автокорреляции (НФАК) и нормированной функции взаимной

корреляции (НФВК) огибающих эхо-сигналов [4], приведены на графиках (Рис. 1)

$$\rho_{xx}(\tau) = \exp[-a \cdot (V \cdot \tau)^2], \quad (4)$$

$$\rho_{xy}(\tau) = \exp\{-a \cdot [(X_0 \cdot \sin(C))^2 + \{ + (X_0 \cdot \cos(C) - V \cdot \tau)^2 \}], \quad (5)$$

где  $a = 2\pi\Delta_s^2/\lambda^2 = k \cdot \Delta_s^2/\lambda$ ;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\tau$  – корреляционная временная задержка;  $C$  – угол сноса судна;  $\Delta_s$  – эквивалентная ширина характеристики направленности антенной системы.

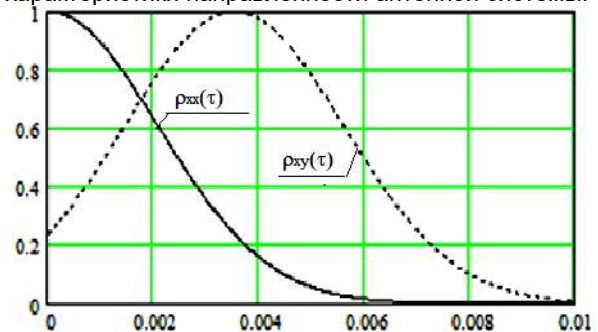


Рис. 1. Вид теоретически рассчитанных авто- и взаимной корреляционных функций при движении судна со скоростью 5,14 м/с и углом сноса  $0^\circ$

Анализируя графики, приведённые на рис. 1, можно сделать вывод, что параметры антенной системы КГАЛ соответствуют требованиям, заявленным в начале этого пункта.

### 3. Вычислительный эксперимент

С целью подтверждения работоспособности проектируемого корреляционного лага с обоснованными характеристиками приемоизлучающего тракта было произведено компьютерное моделирование его функционирования.

Для этого сформировано два случайных процесса, длительностью по 200, секунд со статистическими характеристиками идентичными принятым эхосигналам от дна, что практически соответствует длительности переходных процессов в вычислительных устройствах лагов при плавании в открытом море на спокойной воде.

Моделирование амплитуд огибающих эхосигналов выполнено по методу, опубликованному в работах [11–14].

Для моделирования используются данные с ранее обоснованными характеристиками антенной системы и параметрами движения судна:  $V=5,14$  м/с,  $C=0^\circ$ ,  $t_0=0,003526$  с,  $t_1=0,003526$  с,  $t_2=0,001763$  с.

При таких условиях ширина полосы частот принимаемого высокочастотного сигнала несущей частоты составляет примерно  $f_0 \pm 54$  Гц.

Скорость судна выбрана равной 10 уз, т.к. для этого значения оговариваются требования ИМО к погрешностям судовых лагов.

Кроме того, время осреднения информации о скорости в лагах во время швартовых операций

должно быть около 1,5 с, при движении в узкостях – около 10 с, а при плавании в открытом море – 20...300 с. В последнем случае флуктуационные погрешности лага по скорости будут наименьшими.

Результаты моделирования амплитуд огибающих эхо-сигналов представлены на графиках (Рис. 2), их нормированные авто и взаимные корреляционные функции показаны на графике (Рис. 3), кривые энергетических спектров теоретического и смоделированных эхо-сигналов на осциллограмме (Рис. 4).

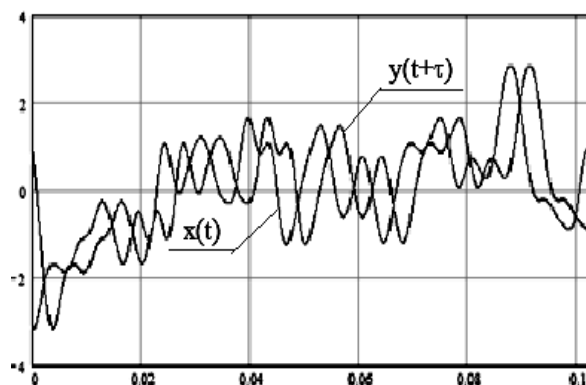


Рис. 2. Фрагмент формы амплитуд огибающих Эхосигналов

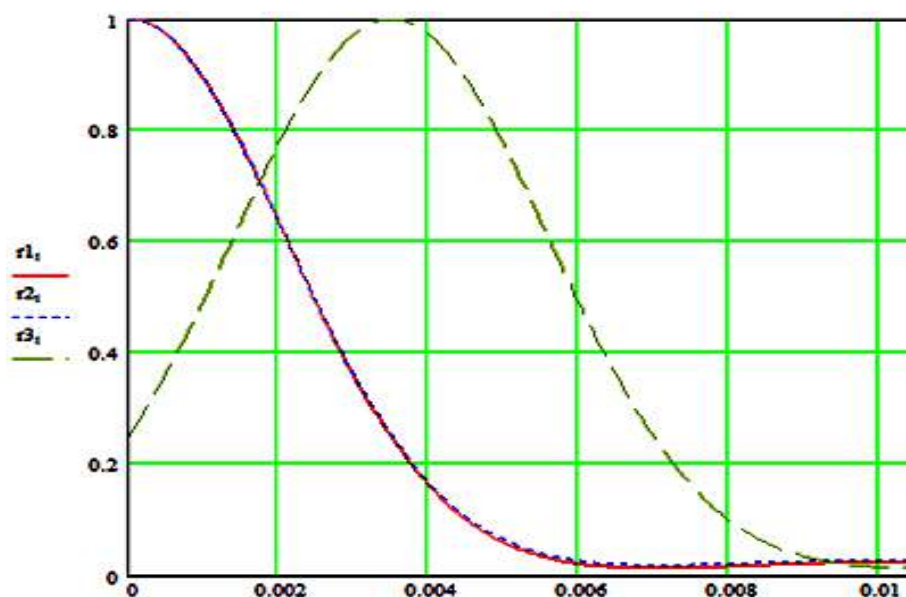


Рисунок 3 – Графики сформированных ( $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$ ) нормированных авто- и взаимной корреляционных функций эхосигналов (при угле сноса  $C=0^\circ$ )

Анализ рисунков 2 – 4 показывает, что сходимость статистических характеристик реальных эхосигналов и сформированных достаточно хорошая. Сформированные процессы можно использовать для машинного моделирования работы вычислительных устройств лагов и оценки эффективности метода повышения точности измерения скорости корреляционными лагами при плавании с углом сноса.

В соответствие с результатами работ [2–4], в пакете прикладных программ SciLab-5.5.2

синтезирована функциональная схема вычислительного устройства лага для измерения продольной (курсовой) скорости судна с традиционным мультипликативным коррелятором (Рис. 5) и постоянной времени осреднения равной 20 секундам.

Осциллограммы сигналов в установившемся режиме работы на выходе мультиплексора MUX, которые наглядно показывают, что схема при использовании сформированных сигналов работоспособна представлены графически (Рис. 6).

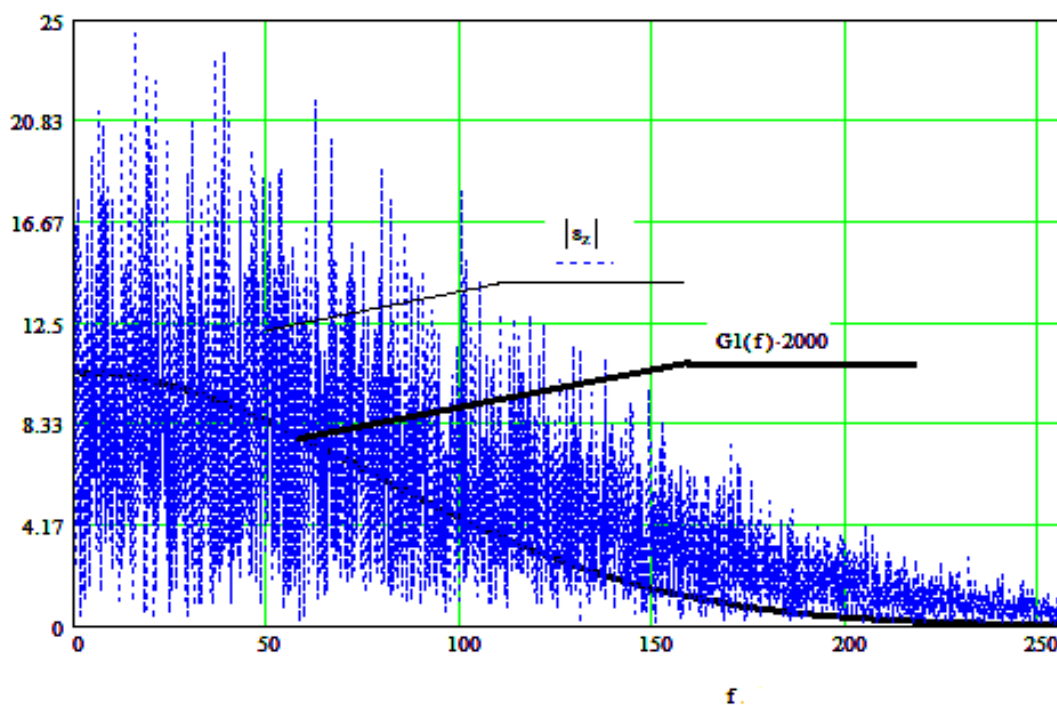


Рис. 4. Кривые энергетических спектров: теоретический (G1) и сформированных (s<sub>z</sub>) эхосигналов

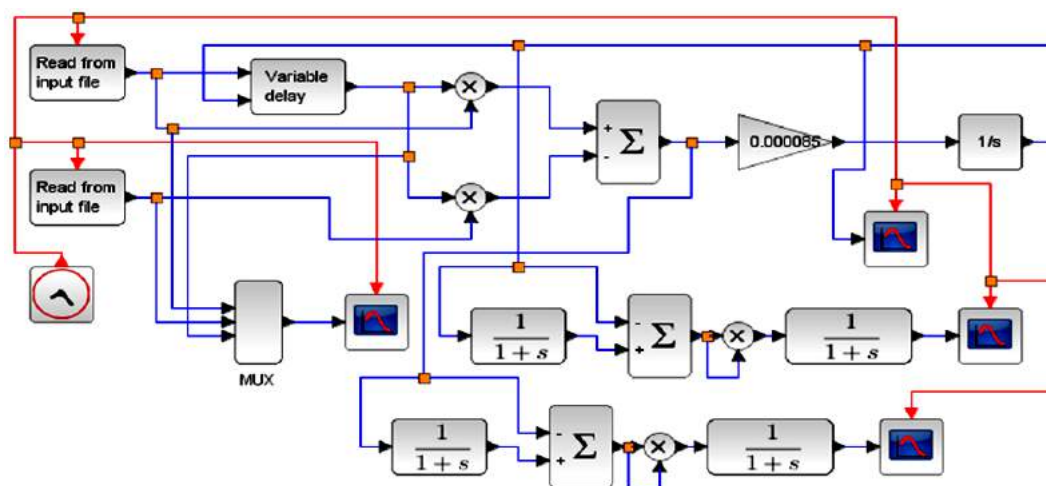


Рис. 5. Схема вычислительного устройства корреляционного лага с измерителями дисперсий сигналов

Основной мерой величины случайной погрешности лага считают среднюю квадратическую погрешность измерения скорости, которую можно получить, измерив дисперсию сигналов системы слежения за величиной корреляционной задержки вычислительного устройства лага (Рис. 8, 9).

При известных величинах дисперсии сигнала слежения (D<sub>τ</sub>) на выходе вычислительного устройства лага и истинной корреляционной задержке в установившемся режиме эта погрешность вычисляется по формуле

$$\delta V [\%] = \frac{\sqrt{D_{\tau}}}{\tau_i} \cdot 100\% \quad (6)$$

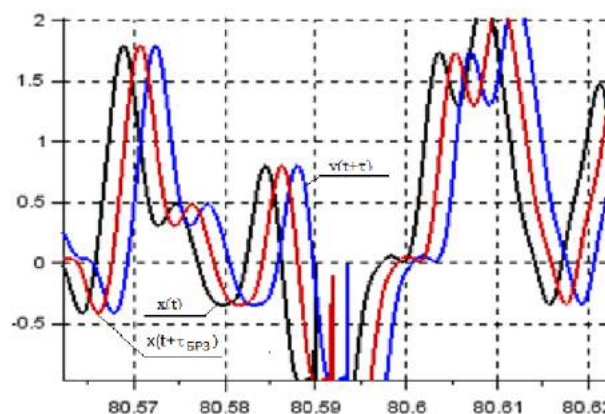


Рис. 6. Фрагмент сформированных эхосигналов при угле сноса 0°

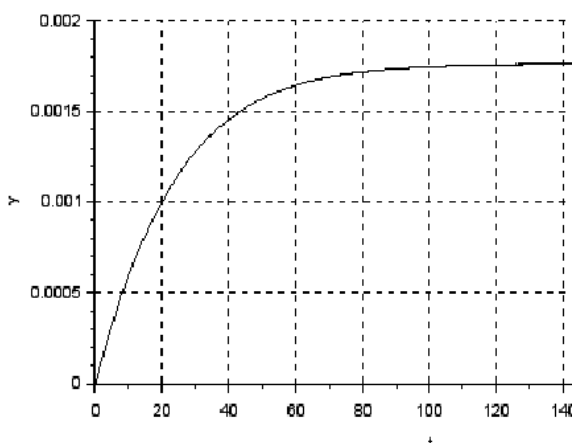


Рис. 7. График переходного процесса измерения корреляционной задержки

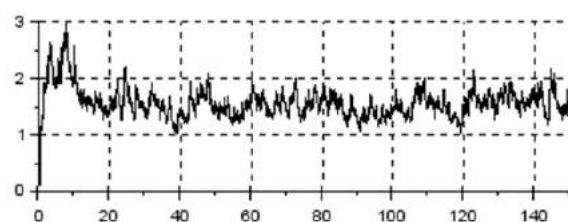


Рис. 8. Дисперсия сигнала на выходе вычитающего устройства

При средней величине дисперсии измеренной корреляционной задержки  $D_T \approx 4 \cdot 10^{-14} \text{ с}^2$  (Рис. 9) и коэффициенте передачи на интегратор равном  $k_p = 0,000085$ , при величине которого обеспечивается время осреднения 20 с, относительная средняя квадратическая погрешность измерения продольной скорости составит  $\delta V_x \approx 0,01\%$ .

Достаточно малая величина погрешности обусловлена использованием сформированных сигналов, не отягощённых помехами и шумами приёмноизлучающего тракта.

Выражение для расчёта средняя квадратическая погрешность (флюктуационной) погрешности измерения продольной скорости судна получено в работе [4]:

$$\delta V_2 = \frac{\sqrt{1+\rho_2^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{\lambda}{\Delta_3}\right)^3}}{8,43 \cdot X_0 \cdot \rho_2 \cdot \sqrt{VT}} \times \exp\left[-\frac{\pi \Delta_3^2}{\lambda^2} \cdot X_0^2 \cdot \sin^2 C\right] \times \frac{1}{\sqrt{-\ln \rho_2} + \sqrt{-\ln \rho_2 - (2\pi \Delta_3^2 / \lambda^2) \cdot (X_0 \cdot \sin C)^2}} \quad (7)$$

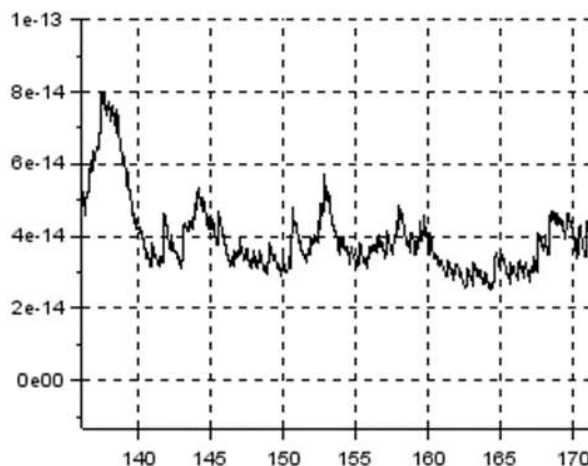


Рис. 9. Дисперсия измеренной корреляционной задержки

Для принятых исходных данных, постоянной времени осреднения равной 20 сек, которая используется в отечественных относительных индукционных лагах серии «ИЭЛ» [2], величина относительной средней квадратической погрешности, рассчитанной формуле (7) не превышает 0,7%.

### Заключение

Анализ графиков на (Рис. 6–9) и величин погрешностей, полученных теоретическим путём и по результатам моделирования, позволяет сделать вывод, что разработанная методика обоснования основных характеристик корреляционного лага работоспособна и может быть использована при разработке перспективных судовых лагов.

### Литература

1. Букатый, В. М. Гидроакустические лаги [Текст] / В. М. Букатый, В. И. Дмитриев. – М. : Пищевая промышленность, 1980. – 176 с.
2. Абсолютные и относительные лаги [Текст] / К. А. Виноградов, В. Н. Кошкарев, Б. А. Осюхин, А. А. Хребтов: Справочник. – Л. : Судостроение, 1990. – 264 с.
3. Студеникин, А. И. Устройство и эксплуатация корреляционных лагов фирмы “Consilium Marine” [Текст] / А. И. Студеникин, В. А. Слюсарев // Морской транспорт. Экспресс–информация. Сер. Судовождение, связь и безопасность мореплавания / В/О «Мортехинформреклама». – 2000. – Вып. 7(374). – С. 1–23.
4. Завьялов В. В. Измерители скорости с линейной базой направленных приёмников. Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2004. 176 с.
5. Parker, P.A. Conduction velocity measurement using cross-correlation technique [Text] / P. A. Parker // Proceedings of the Biosigma, Paris, France. – 1978. – P. 108–112.
6. Woodward, B. Estimating backscattering strength for a correlation log [Text] / B. Woodward, W. Fosythe, S. K. Hole // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – Jul 1994. –Vol. 19. – Issue 3. – P. 476–483.
7. Griffiths, G., Bradley S. E. A correlation speed log for deep waters [Text] / G. Griffiths, S. E. Bradley // Sea Technology. – 1998, – 39(3). – P. 29–35.
8. Phillips, B. A new correlation sonar velocity sensor (COVELIA) [Text] / B. Phillips, H. Robinson, M. Hill. Oceanology International 2000, Brighton, March 7–10, 2000.



9. Абелев, А. Б. Обоснование выбора оптимальных параметров навигационных эхолотов для судов морского флота [Текст] : Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ленингр. высш. инж. морское училище им. С. О. Макарова. - Ленинград : 1972. - 19 с.
10. Судовые эхолоты [Текст] / А. А. Хребтов, К. А. Виноградов, В. Н. Кошкарев : Справочник. – Л. : Судостроение, 1982. – 232 с.
11. Завьялов В. В., Артемьев А. В., Панченко А. А. Интервалы корреляции эхо-сигналов, отраженных от неровных поверхностей // Сб. докл. Междунар. НТК, посв. 110-летию мор. образования в Приморье “Наука – морскому образованию на рубеже веков”. 9–10 ноября 2000 г. – Владивосток, 2001. – С. 46 – 49
12. Завьялов В. В., Артемьев А. В. Формирование случайных процессов с заданными характеристиками декорреляции // Сб. статей “Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ”. Вып. 39. – Владивосток: ТОВМИ, 2002. – С. 73 – 78.
13. Завьялов В. В., Артемьев А. В. Моделирование эхо-сигналов измерителей скорости с линейной базой направленных приемников // Транспортное дело России. Спецвыпуск № 2. 2004. С. 107–110.
14. Завьялов В. В., Артемьев А. В., Панченко А. А. Статистические характеристики амплитуд огибающих эхо-сигналов, отраженных от неровных поверхностей // Транспортное дело России. М.: Спецвыпуск № 3. 2005. С. 32-34.

#### References

1. Bukatyj V. M., Dmitriev V.I. Gidroakusticheskie lagi [Hydroacoustic lag]. M. Pishhevaya promy`shlennost`, 1980 176 p.
2. Absolyutny`e i otnositel`ny`e lagi [Absolute and relative lags]. Vinogradov K. A., Koshkarev V. N., Osyuxin B. A., Xrebtov A. A.: Spravochnik. L. : Sudostroenie, 1990, 264 p.
3. Studenikin A.I, Slyusarev V.A (2000) Ustrojstvo i e`kspluatatsiya korrelyacionny`x lagov firmy` “Consilium Marine” [Design and operation of the correlation lags of the company, “Consilium Marine”]. Morskoj transport. E`kspres-sionnaya informatsiya. Ser. Sudovozhdenie, svyaz` i bezopasnost` moreplavaniya, V/O «Mortexinformreklama». 7(374), 1–23.
4. Zav`yalov V. V. Izmeriteli skorosti s linejnoy bazoj napravlenny`x priemnikov [Measuring speed with linear base directional receivers]. Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2004. 176 s.
5. Parker, P.A. Conduction velocity measurement using cross-correlation technique. Proceedings of the Biosigma, Paris, France. 1978, pp. 108–112.
6. Woodward, B. Fosythe, W, Hole, S. K. Estimating backscattering strength for a correlation log.. IEEE Journal of Oceanic Engineering. Jul 1994. Vol. 19. Issue 3, pp. 476–483.
7. Griffiths, G., Bradley S. E. (1998) A correlation speed log for deep waters. Sea Technology. 39(3), pp. 29–35.
8. Phillips B., Robinson H., Hill M. A new correlation sonar velocity sensor (COVELIA). Oceanology International 2000, Brighton, March 7–10, 2000.
9. Abelev, A. B. Obosnovanie vy`bora optimal`ny`x parametrov navigacionny`x e`xolotov dlya sudov morskogo flota. Avtoreferat dis. na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texnicheskix nauk. Leningr. vy`ssh. inzh. morskoe uchilishhe im. S. O. Makarova. - Leningrad : 1972, 19 s.
10. Sudovy`e e`xoloty` [ship`s echosounder]. A. A. Xrebtov, K. A. Vinogradov, V. N. Koshkarev : Spravochnik. L. : Sudostroenie, 1982, 232 s.
11. Zav`yalov V. V., Artem`ev A. V., Panchenko A. A. (2001) Intervaly` korrelyatsii e`xo-signalov, otrazhenny`x ot nerovny`x poverxnostej [The interval of correlation of echo signals reflected from uneven surfaces]. Sb. dokl. Mezhdunar. NTK, posv. 110-letiyu mor. obrazovaniya v Primor`e “Nauka – morskomu obrazovaniyu na rubezhe vekov”. 9–10 noyabrya 2000 g. Vladivostok, pp. 46–49 .
12. Zav`yalov V. V., Artem`ev A. V. (2002) Formirovanie sluchajny`x processov s zadanny`mi karakteristikami dekorrelyatsii [Formation of random processes with specified characteristics of decorrelation]. Sb. statej “Problemy` i metody` razrabotki i e`kspluatatsii vooruzheniya i voennoj texniki VMF”. Vy`p. 39. Vladivostok: TOVMI, pp. 73 – 78.
13. Zav`yalov V. V., Artem`ev A. V. (2004) Modelirovanie e`xo-signalov izmeritelej skorosti s linejnoy bazoj napravlenny`x priemnikov [Simulation of echo signals of speed meters with a linear base of directional receivers]. Transportnoe delo Rossii. Speczvy`pusk 2, pp. 107–110.
14. Zav`yalov V. V., Artem`ev A. V., Panchenko A. A. (2005) Statisticheskie xarakteristiki amplitud ogibayushhix e`xo-signalov, otrazhenny`x ot nerovny`x poverxnostej [The statistical characteristics of the amplitudes of the envelopes of echo signals reflected from uneven surfaces]. Transportnoe delo Rossii. M.: Speczvy`pusk, 3, pp. 32-34.

УДК 623.98: 534.222: 004.93<sup>1</sup>

## СИСТЕМА КЛАССИФИКАЦИИ МОРСКИХ ЦЕЛЕЙ НА БАЗЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Валерий Александрович Пятакович**

кандидат технических наук, доцент

начальник научно-исследовательской лаборатории

Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. адм. С.О. Макарова

690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6

тел. +7(914) 662-70-32, e-mail: pva.877com@mail.ru

### Аннотация

В работе представлена система обнаружения и классификации морских целей, содержащая сформированную в морской среде рабочую зону нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования волн накачки и информационных волн. Приводится схема ее работы. Перспективы рассматриваемого подхода решения поставленной задачи состоят в том, что можно принимать правильные решения в условиях неполной и нечеткой входной информации об идентифицируемом объекте. Предлагаемая к обсуждению система промышленно применима, так как для ее создания используются распространенные компоненты и изделия радиотехнической промышленности и вычислительной техники. Реализация разрабатываемого комплекса вычислительных операций нейронных сетей на многопроцессорных нейроподобных сверхбольших интегральных схемах в виде нейросетевой экспертной системы для распознавания и классификации измеряемых информационных полей морских объектов системой мониторинга морских акваторий, обеспечит возможность решения многофункциональных задач морской науки и оборонного комплекса государства.

**Ключевые слова:** классификация морских объектов; математическая модель; нечеткие множества; нечеткая логика; нейросетевая экспертная система; амплитудно-частотная характеристика; пространство Фурье; методика Хинчина

## MARINE TARGET CLASSIFICATION SYSTEM BASED ON NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES

**Valeriy A. Pyatakovich**

associate professor, Cand. Sci. Tech.

Director of the research laboratory

Pacific Higher Naval School named Admiral S. Makarov

6, Kamskiy pereulok, 690062, Vladivostok, Russia

tel. +7(914) 662-70-32, e-mail: pva.877com@mail.ru

### Abstract

The marine target detection and classification system which contains a working zone, formed in the marine environment, of nonlinear interaction and of parametric transformation of pump waves and information waves is presented. The scheme of its operation is given. The prospects of the discussed approach to the solution of the formulated problem are that right decisions can be made under conditions of incomplete and unclear input information about the object being identified. The system proposed for discussion is industrially applicable, as it uses common components and products of the radio engineering industry and computer technology. The practical implementation of the system that is developed for executing the computing operations by way of neural network on the multiprocessor neural VLSI circuits in the form of neural network expert system for the identification and classification of measured information fields of sea objects as part of sea waters' monitoring system will provide the ability to solve multi-functional problems of marine science and of the defense industry of the State.

**Key words:** classification of sea objects; mathematical model; fuzzy sets; fuzzy logic; neural network expert system; amplitude frequency characteristic; Fourier space; Khinchin method

### Введение

Интеллектуальная система обнаружения и классификации морских целей [1], содержит сформированную в морской среде рабочую зону нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования волн накачки и информационных волн, причем длина рабочей зоны равна протяженности контролируемого участка морской среды, для чего излучающий и приемный преобразователи размещены на противоположных границах участка, при этом вход излучающего

преобразователя соединен подводным кабелем с выходом тракта излучения сигналов накачки, который содержит последовательно соединенные генератор сигналов накачки стабилизированной частоты, усилитель мощности и блок согласования его выхода с подводным кабелем, а выход приемного преобразователя соединен подводным кабелем с входом тракта приема, обработки и регистрации информационных сигналов, который содержит последовательно соединенные широкополосный усилитель, преобразователь частотно-временного



масштаба, спектроанализатор и функционально связанный с ним регистратор, отличающаяся тем, что дополнительно введен тракт нейросетевого распознавания и классификации, содержащий блок распознавания класса цели по амплитудно-частотным характеристикам, охваченный обратной связью с блоком обучения; при этом выход спектроанализатора тракта приема, обработки и регистрации информационных волн соединен с входом блока распознавания класса цели по амплитудно-частотным характеристикам тракта нейросетевого распознавания и классификации, на выходе которого формируется сигнал по типу цели согласно степени принадлежности исследуемой области спектра объекту классификации.

**1. Анализ результатов исследования и испытания параметрических антенн**

Исследованиями и испытаниями параметрических антенн, использующих высокочастотную накачку морской среды (десять-сотни кГц) показано, что их недостатками, как измерительных систем, являются малая дальность параметрического приема волн (сотни метров и только в отдельных случаях 1–2 километра) и ограниченная возможность измерения пространственно-временных характеристик сигналов, что особенно проявляется при приеме волн различной физической природы низкого, инфразвукового и дробного диапазонов частот.

Параметрические антенны, работа которых основана на низкочастотной подсветке (накачке) среды слабозатухающими сигналами с частотой десятки-сотни герц, представляют собой сформированные в морской среде протяженные объемные зоны нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования сигналов. Что приводит к увеличению дальности параметрического приема волн в десятки-сотни раз, относительно высокочастотных параметрических антенн [2, 3].

Низкочастотные пространственно-развитые параметрические антенны формируются и функционируют на основе закономерностей многолучевого распространения просветных акустических волн (сигналов накачки морской среды

стабилизированной частоты в диапазоне десятки-сотни герц) в протяженном гидроакустическом канале с переменными характеристиками среды и его границ. Дальний параметрический прием информационных волн основан на закономерностях нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования излученных просветных волн с волнами, генерируемыми техническими объектами (морскими целями), при их совместном распространении в морской среде. Техническая сущность некоторых аналогов рассмотрена в [4, 5].

Известно, что результатом параметрического преобразования взаимодействующих волн является их взаимная амплитудно-фазовая модуляция. Малое отличие частот (в пределах одного порядка) просветных волн и волн, генерируемых объектом, обеспечивает наиболее интенсивное их взаимодействие. Амплитуда взаимодействующих волн и индекс фазовой модуляции могут быть представлены в следующем виде

$$R_k = \frac{(y + 1) \cdot \omega_n \cdot \omega_c P_n P_c V}{4\rho_0(c_0)^3 R^2}; \Delta\varphi = \frac{(y + 1) \cdot \omega_c P_c V}{2\rho_0(c_0)^3 R^2},$$

где  $Y$  – коэффициент нелинейности морской среды;  $\omega_n, \omega_c$  – частота волны накачки и полезного сигнала,

соответственно;  $P_n, P_c$  – затухание волны накачки и полезного сигнала, соответственно;  $V$  – объем среды нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования волн;  $R$  – расстояние от точки излучения до точки расположения объекта;  $\rho_0$  – плотность,  $c_0$  – скорость звука в морской среде.

Сформированные в результате преобразования просветных волн параметрические составляющие суммарной и разностной частоты при обработке широкополосных сигналов выделяются, как признаки амплитудно-фазовой модуляции, что обосновано математическими зависимостями и подтверждено результатами морских экспериментов [6].

Спектр взаимодействующих волн состоит из бесконечного числа боковых составляющих, частоту и амплитуду которых можно найти из известного выражения.

$$P^*(t) = 0,5P^2\{J_0(m_p)\cos 2\omega t + J_1(m_p)[\cos(2\omega - \Omega)t - \cos(2\omega + \Omega)t] + J_2\left(\frac{2A_2}{P}\right)[\cos(2\omega - 2\Omega)t + \cos(2\omega + 2\Omega)t] + J_3\left(\frac{2A_3}{P}\right)[\cos(2\omega - 3\Omega)t - \cos(2\omega + 3\Omega)t] + \dots\},$$

где  $P^*(t), P,$  – результирующее и мгновенное значения давления модулированной волны, соответственно;  $2\omega_c$  – удвоенная частота модулированной волны;  $\Omega$  – волна, генерируемая объектом;  $t$  – время;  $J_n$  – функции Бесселя  $n$ -го порядка;  $A_n$  – амплитуда модулированной волны;  $m_p$  – коэффициент модуляции.

Как видно из выражения, значения частот боковых составляющих отличаются от удвоенной центральной частоты  $2\omega$  (равной сумме частот взаимодействующих волн) на величину  $\pm n\Omega$ , где  $n$  – любое целое число.

Амплитуды боковых составляющих для соответствующих частот  $(2\omega \pm n\Omega)$  определяются величиной множителя

$$0,5P^2 J_n\left(\frac{2A_n}{P}\right).$$

При малых значениях коэффициента модуляции  $m_p$  спектр взаимодействующих волн приближенно состоит из удвоенной центральной частоты  $2\omega$  и ее боковых частот  $2\omega + \Omega$  и  $2\omega - \Omega$ .

**2. Недостатки структурных схем распознавания классов морских целей**

Недостатком систем [4, 5] является отсутствие в структурной схеме специальных блоков и их связей с существующими блоками, которые должны обеспечивать (надводный или подводный объект), что ограничивает функциональные возможности системы-прототипа.

Задача, на решение которой направлено заявляемое изобретение, заключается в

дальнейшей разработке структурной схемы системы-прототипа для ее реализации как интеллектуальной системы обнаружения и классификации морских целей, которая должна распознавать класс цели по амплитудно-частотным характеристикам сигналов в автоматизированном режиме работы.

Результатом предлагаемого к обсуждению технического решения является автоматизация процесса распознавания классов морских целей (надводный или подводный объект), обнаруженных по признакам амплитудно-фазовой модуляции низкочастотных сигналов накачки морской среды излучениями и полями объектов. Указанный технический результат достигается путем применения вычислительных операций нейронных сетей и оперативно обновляемой библиотеки математически обработанных образов спектрограмм морских целей.

### 3. Структура системы классификации морских целей

Для решения поставленной задачи интеллектуальная система обнаружения и классификации морских целей, содержащая сформированную в морской среде рабочую зону нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования волн накачки и информационных волн, причем длина рабочей зоны равна протяженности контролируемого участка морской среды, для чего излучающий и приемный преобразователи размещены на его противоположных границах, при этом вход излучающего преобразователя соединен подводным кабелем с выходом тракта излучения сигналов накачки, который содержит последовательно соединенные генератор сигналов накачки стабилизированной частоты, усилитель мощности и блок согласования его выхода с подводным кабелем, а выход приемного преобразователя соединен подводным кабелем с входом тракта приема, обработки и регистрации информационных сигналов, который содержит последовательно соединенные широкополосный усилитель, преобразователь частотно-временного масштаба, спектроанализатор и функционально связанный с ним регистратор.

Принципиальным отличием от [4, 5] является то, что дополнительно введен тракт нейросетевого распознавания и классификации, содержащий блок распознавания класса цели по амплитудно-частотным характеристикам, охваченный обратной связью с блоком обучения; при этом выход спектроанализатора тракта приема, обработки и регистрации информационных волн соединен с входом блока распознавания класса цели по амплитудно-частотным характеристикам тракта нейросетевого распознавания и классификации, на выходе которого формируется сигнал по типу цели согласно степени принадлежности исследуемой области спектра объекту классификации.

Как известно [2, 6, 10], извлечение полезной информации из гидроакустических сигналов определяет основы алгоритмизации обработки данных в интеллектуальной системе обнаружения и классификации морских целей. Для формирования вектора признаков, являющегося входным информационным массивом распознающей сети,

используется метод масок. 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 [7–9].

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. Итерации сети завершаются после того, как выходные нейроны сети перестают меняться. Тип элементов входных сигналов – целые или действительные числа, тип элементов выходных сигналов – действительные числа. Размерности входных и выходных сигналов совпадают. Тип активационной функции – линейная с насыщением (используется линейный участок). Число синапсов в сети равно  $N(N - 1)$ . Формирование синаптических весов происходит согласно формуле

$$W_{ij} = \begin{cases} 1, & j = i, \quad i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, N \\ -\varepsilon, & j \neq i, \quad \varepsilon \leq \frac{1}{N}, \end{cases}$$

где  $W_{ij}$  –  $i$ -й синаптический вес  $j$ -го нейрона;  $N$  – число элементов входного сигнала (количество нейронов в сети).

Функционирование сети задается выражением

$$y_j(0) = x_j, y_j(t + 1) = f \left\{ y_j(t) - \varepsilon \sum_{i \neq j} [y_i(t)] \right\},$$

$$i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, N,$$

где  $x_j$  – элемент (орт) входного сигнала сети;  $y_i$  – выход  $j$ -го нейрона.

Нормализация входного вектора признаков, полученного после анализа масок сетью MAXNET, производится согласно выражения

$$x_i = \frac{(\bar{x}_i - \bar{x}_i^{min})}{(\bar{x}_i^{max} - \bar{x}_i^{min})}.$$

Границы диапазона значений  $\bar{x}_i^{max}, \bar{x}_i^{min}$  известны и определяются моделью входного гидроакустического сигнала.

Обучение распознающей сети производится на основе алгоритма обратного распространения ошибки, реализующего градиентный метод оптимизации функционала вида:  $F = \|Y(T, X^*) - Y^*\|^2$  где  $T$  – вектор синаптических весов сети;  $(X^*, Y^*)$  – обучающие пары;  $\|...\|$  – норма вектора [10–12].

На схеме (Рис. 1) представлена функциональная схема интеллектуальной системы обнаружения и классификации морских целей.

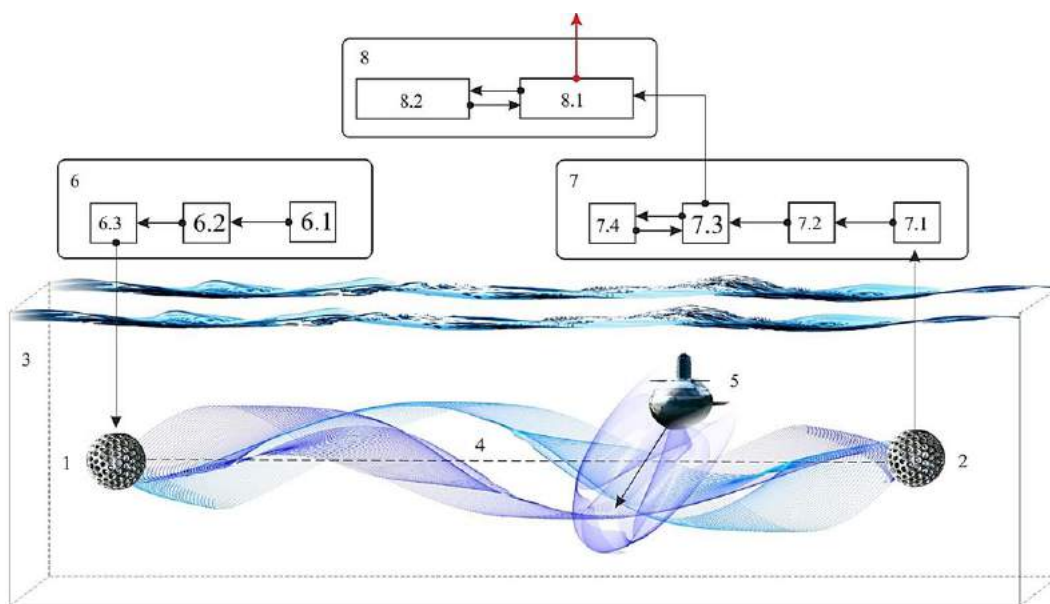


Рис. 1 Функциональная схема интеллектуальной системы обнаружения и классификации морских целей

Схема (Рис. 1) содержит следующие элементы: 1. Излучающий преобразователь (подводный звуковой маяк марки ПЗМ-400 излучающий сигналы на частоте около 400 Гц); 2. Приемный преобразователь; 3. Морская среда; 4. Рабочая зона нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования волн накачки и информационных волн; 5. Объекты (морские цели, генерирующие акустические, электромагнитные и гидродинамические излучения); 6. Тракт излучения сигналов накачки; 6.1. Генератор сигналов накачки стабилизированной частоты, 6.2. Усилитель мощности; 6.3. Блок согласования; 7. Тракт приема,

обработки и регистрации информационных сигналов; 7.1. Широкополосный усилитель; 7.2. Преобразователь частотно-временного масштаба; 7.3. Спектроанализатор; 7.4. Рекордер; 8. Тракт нейросетевого распознавания и классификации; 8.1. Блок распознавания класса цели по амплитудно-частотным характеристикам; 8.2. Блок обучения.

На схеме (Рис. 2) показан промежуточный нейрон, получающий входные сигналы с выходов других нейронов.

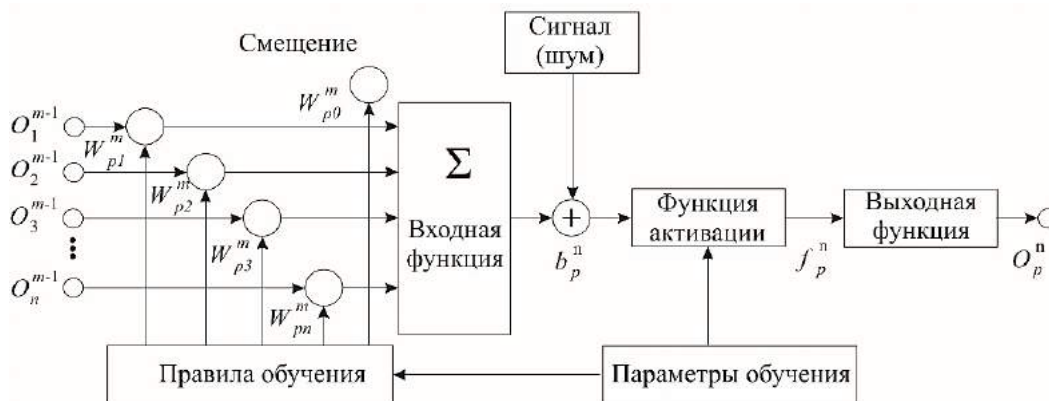


Рис. 2. Обобщенная структура отдельного нейрона распознающей сети

Входная функция нейрона, расположенного в  $m$ -ом слое, реализует операцию суммирования взвешенных выходов  $O_n^{m-1}$  пересинаптических нейронов, расположенных в предыдущем,  $(m-1)$ -м слое:

$$b_p^m = \sum_{n=1}^N W_{pn}^m O_n^{m-1} + W_{p0}^m,$$

где:  $N_{m-1}$  – число нейронов в предыдущем слое;  $n$ ,  $p$  – нейроны, принадлежащие разным слоям;  $W_{p0}^m$  – величина внешнего смещения, подаваемого на

нейрон  $p$ , что соответствует включению в модель нейрона дополнительной синаптической связи с фиксированным значением сигнала =1

Результат суммирования служит аргументом функции активации. Значение функции активации соответствует отклику нейрона на произвольную комбинацию входных воздействий.

Выходная функция нейрона определяет взаимосвязь между уровнем активации  $f_p^m$  нейрона  $p$   $m$ -го слоя и величиной его действительного

выходного сигнала  $O_p^m$ , передаваемого в последующий слой или на выход сети. В модели нейрона с нелинейной функцией активации, непосредственная передача значения  $f_p^m$  на выход нейрона оказывается достаточной, т. е.  $O_p^m = f_p^m$ .

Нейроны, составляющие сеть, одинаковы и имеют функцию активации известного типа

$$y_n^{(i)} = \frac{1}{\pi} \arctg \left[ \sum_{r=1}^{N_i} T_{2n}^{(i)} x_{2n}^{(i)} + I_n^{(i)} \right] + 0,5,$$

где  $x_{2n}^{(i)}, y_n^{(i)}$  и  $I_n^{(i)}$  – значения  $r$  – го входного сигнала, выходного сигнала и внешнего смещения  $n$  – го нейрона  $i$  – го слоя;  $N_i$  – число нейронов в  $i$  – м слое;  $i = 1, 2, 3$ .

**4. Работа системы классификации морских целей базе нейросетевых технологий**

Излучающий преобразователь 1 и приемный преобразователь 2 размещают в морской среде 3 с учетом закономерностей многолучевого распространения волн в протяженном гидроакустическом канале, что обеспечивает формирование и эффективное использование пространственно-развитой рабочей зоны 4 нелинейного взаимодействия и параметрического преобразования просветных волн и волн различной физической природы, генерируемых объектами 5 [13–15].

Сформированный генератором 6.1 сигнал накачки стабилизированной частоты поступает на вход усилителя мощности 6.2, затем на вход блока согласования 6.3 выхода усилителя мощности 6.2 с подводным кабелем, соединяющим выход тракта излучения сигналов накачки 6 и вход излучающего преобразователя 1. Излучающий преобразователь 1 озвучивает среду сигналами накачки стабилизированной частоты в диапазоне десятки–сотни герц. На различных режимах движения объекты 5 генерируют излучения, приводящие к изменению величины характеристик проводящей жидкости (плотности и (или) температуры и (или) теплоемкости и т.д.), которые в зависимости от их физической сущности модулируют низкочастотные сигналы накачки морской среды. В спектре информационной волны появляются низкочастотные и высокочастотные составляющие, как результат модуляции амплитуды и фазы низкочастотной волны накачки излучениями и полями объектов 5. Являясь неразрывно связанной компонентой просветной волны модуляционные составляющие переносятся на большие расстояния и обнаруживаются в блоках тракта приема, обработки и регистрации информационных сигналов 7.

Сигнал приемного преобразователя 2 по кабельной линии подается на вход широкополосного усилителя 7.1 тракта приема обработки и регистрации информационных сигналов 7. Задачей блоков, входящих в состав тракта приема обработки и регистрации информационных сигналов 2, является измерение признаков проявления информационных волн источников.

Сигнал с выхода широкополосного усилителя 7.1 подается на вход преобразователя частотно-временного масштаба 7.2. Преобразователь частотно-временного масштаба сигнала обеспечивает увеличение концентрации энергии просветных сигналов и эффективность выделения из них признаков полей, формируемых объектами.

Сигнал с выхода преобразователя частотно-временного масштаба 7.1 поступает на вход спектроанализатора 7.3. Задачей спектрального анализа является выделение дискретных составляющих суммарной или разностной частоты в узкополосных спектрах преобразованных информационных сигналов, по которым восстанавливают характеристики волн объектов 5.

Далее сигнал с выхода спектроанализатора 7.3 передается на вход рекордера 7.4 и на вход блока распознавания класса цели по амплитудно-частотным характеристикам 8.1 тракта нейросетевого распознавания и классификации 8.

Задача распознавания и классификации надводных и подводных источников гидроакустических сигналов решается с помощью трехслойной нейронной сети, которая распознает семь объектов и позволяет выделить один неизвестный класс, что в перспективе позволит значительно расширить круг распознаваемых морских технических объектов.

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. Как показано на фиг. 2, на каждый нейрон первого слоя через синапсы с весами  $\{T_{ij}^{(1)}\}$ ,  $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$  подаются все компоненты входного вектора  $\vec{X} = X(x_1, x_2, x_3)$ . 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 каждый нейрон 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 Таблице 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-частотным характеристикам 8.1 поступает в память блока обучения 8.2, 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.

Сформированный третьим слоем распознающей нейронной сети сигнал по типу цели, согласно степени принадлежности исследуемой области спектра объекту классификации, поступает с выхода

блока 8.2 на вход блока 8.1, выход которого является выходом тракта нерасчетного распознавания и классификации 8.

### Заключение

Таким образом, обнаружив цель по признакам амплитудно-фазовой модуляции низкочастотных сигналов накачки морской среды излучениями и полями объекта и используя оперативно обновляемую библиотеку математически обработанных образов спектрограмм морских целей, а также архитектуру распознающей нейронной сети в виде трехслойного персептрона, можно в автоматизированном режиме распознавать класс цели по амплитудно-частотным характеристикам и делать вывод о степени принадлежности исследуемой области спектра объекту классификации.

### Литература

1. Пятакович В.А., Филиппов Е.Г. Нейросетевая система в задаче управления распознаванием сложного технического объекта в морской среде. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 7. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – С. 239–246.
2. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Василенко А.М. и др. Нелинейная просветная гидроакустика и средства морского приборостроения в создании Дальневосточной радиогидроакустической системы освещения атмосферы, океана и земной коры, мониторинга их полей различной физической природы: монография. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2014. – 404 с.
3. Малашенко А.Е., Мироненко М.В., Чудаков М.В., Пятакович В.А. Дальний параметрический прием электромагнитных волн, формируемых техническими источниками в морской среде. Датчики и системы – М.: 2016. – № 8-9 (206). – С. 14–18.
4. 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
5. Патент РФ №2549207. Устройство обнаружения шумовых гидроакустических сигналов на основе квадратного приемника / Смагулов А.Б., Бутырский Е.Ю., Шаталов Г.В.
6. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Карачун Л.Э., Василенко А.М. Низкочастотный просветный метод дальней гидролокации гидрофизических полей морской среды: монография. – Владивосток: СКБ САМИ ДВО РАН, 2006. – 173 с.
7. Пятакович В.А., Богданов В.И., Назаренко П.К. Принцип автоматического распознавания образа цели: материалы Международной конференции «Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов». – Ульяновск: УГУ, 2003. – С. 31, 32.
8. Пятакович В.А., Василенко А.М., Мироненко М.В. Технологии нелинейной просветной гидроакустики и нейро-нечетких операций в задачах распознавания морских объектов: монография. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016 190 с.
9. Пятакович В.А., Василенко А.М., Рычкова В.Ф. Интеллектуальная система нейросетевой классификации морских целей // Морские интеллектуальные технологии. – СПб.: 2018. № 2 (40) Том 2. С. 115–120.
10. Пятакович В.А., Василенко А.М., Рычкова В.Ф. Способ классификации подводных технических объектов экспертной интеллектуальной системой с приемной параметрической антенной // Морские интеллектуальные технологии. – СПб.: 2018. № 2 (40) Том 2. С. 121–126.
11. Пятакович В.А., Василенко А.М. Предварительная обработка информации нейроподобным категоризатором при распознавании образов морских объектов. Подводное морское оружие. – СПб: 2017. – Вып. 1 (32). – С. 31–34.
12. Пятакович В.А., Василенко А.М. Перспективы и ограничения использования геометрических методов распознавания акустических образов морских объектов применительно к задаче управления нейросетевой экспертной системой. Фундаментальные исследования. – М: 2017. – № 7. – С. 65–70.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016616822 РФ. Расчет лучевой картины / Василенко А.М., Пятакович В.А., Алексеев О.А.; 2016.
14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017664296 РФ. Программа имитационного моделирования процесса распространения гидроакустических сигналов / Василенко А.М., Пятакович В.А.; 2017.
15. Свидетельство о государственной 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.

### References

1. Pyatakovich V.A., Filippov E.G. Neirosetevaya sistema v zadache upravleniya raspoznavaniem slozhnogo texnicheskogo ob`ekta v morskoy srede. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Texnicheskie nauki. Vy`p. 7. Tula: Izd-vo TulGU, 2017. – S. 239–246.

2. Mironenko M.V., Malashenko A.E., Vasilenko A.M. i dr. Nelinejnaya prosvetnaya gidroakustika i sredstva morskogo priborostroeniya v sozdanii Dal'nevostochnoj radiogidroakusticheskoy sistemy osvesheniya atmosfery, okeana i zemnoj kory, monitoringa ix polej razlichnoj fizicheskoy prirody: monografiya. – Vladivostok: Izd-vo Dal'nevost. un-ta, 2014. – 404 s.
3. Malashenko A.E., Mironenko M.V., Chudakov M.V., Pyatakovich V.A. Dal'nij parametriceskij priem e'lektromagnitny'x voln, formiruemy'x texnicheskimi istochnikami v morskoj srede. Datchiki i sistemy – M.: 2016. – № 8-9 (206). – S. 14–18.
4. Patent RF № 2593624. Radiogidroakusticheskaya sistema peredachi informacionny'x voln iz morskoy sredy v atmosferu i obratno / Mironenko M.V., Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A.; 2016
5. Patent RF №2549207. Ustrojstvo obnaruzheniya shumov'x gidroakusticheskix signalov na osnove kvadraturnogo priemnika / Smagulov A.B., Buty'rkij E.Yu., Shatalov G.V.
6. Mironenko M.V., Malashenko A.E., Karachun L.E., Vasilenko A.M. Nizkochastotny'j prosvetny'j metod dal'nej gidrolokacii gidrofizicheskix polej morskoy sredy: monografiya. – Vladivostok: SKB SAMI DVO RAN, 2006. – 173 s.
7. Pyatakovich V.A., Bogdanov V.I., Nazarenko P.K. Princip avtomaticheskogo raspoznavaniya obraza celi: materialy' Mezhdunarodnoj konferencii «Matematicheskoe modelirovanie fizicheskix, e'konomicheskix, texnicheskix, social'ny'x sistem i processov». – Ul'yanovsk: UGU, 2003. – S. 31, 32.
8. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Mironenko M.V. Technology low-frequency nonlinear hydroacoustics and neuro-fuzzy operations in pattern recognition of marine objects. Vladivostok, DVFU Publ., 2016, 190 p.
9. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Ry'chkova V.F. Intellektual'naya sistema nejrosetevoj klassifikacii morskix celej // Morskie intellektual'ny'e texnologii. – SPb.: 2018. № 2 (40) Tom 2. S. 115–120.
10. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Ry'chkova V.F. Sposob klassifikacii podvodny'x texnicheskix ob'ektov e'kspertnoj intellektual'noj sistemoj s priemnoj parametriceskoy antennoj // Morskie intellektual'ny'e texnologii. – SPb.: 2018. № 2 (40) Tom 2. S. 121–126.
11. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M. Predvaritel'naya obrabotka informacii nejronopodobny'm kategorizatorom pri raspoznavanii obrazov morskix ob'ektov. Podvodnoe morskoe oruzhie. – SPb: 2017. – Vy'p. 1 (32). – S. 31–34.
12. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M. Perspektivy' i ogranicheniya ispol'zovaniya geometricheskix metodov raspoznavaniya akusticheskix obrazov morskix ob'ektov primenitel'no k zadache upravleniya nejrosetevoj e'kspertnoj sistemoj. Fundamental'ny'e issledovaniya. – M: 2017. – № 7. – S. 65–70
13. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy' dlya E`VM №2016616822 RF. Raschet luchevoj kartiny' / Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A., Alekseev O.A.; 2016.
14. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy' dlya E`VM №2017664296 RF. Programma imitacionnogo modelirovaniya processa rasprostraneniya gidroakusticheskix signalov / Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A.; 2017.
15. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy' dlya E`VM № 2018612169 RF. Programmno-vychislitel'ny'j kompleks imitacionnogo modelirovaniya morskoy informacionnoj situacii pri identifikacii celej / Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A.; 2017.

УДК 004.8:656.614.3(985)

## МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АРКТИЧЕСКИХ МОРСКИХ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКИХ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Евгения Юрьевна Соболевская**

старший преподаватель кафедры Информационных технологий и систем  
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса  
190014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41  
тел. +7(914) 656 -57-37, e-mail: study\_z@list.ru

**Сергей Витальевич Глушков**

доктор технических наук, профессор  
декан Электромеханического факультета  
Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: +7 (964) 443-32-53, e-mail: gluskov@msun.ru

**Наталья Георгиевна Левченко**

кандидат технических наук  
доцент кафедры Автоматических и информационных систем  
Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел. +7 (914) 685-99-21, e-mail: levchenko@msun.ru

### Аннотация

Анализ существующих программных средств и информационных ресурсов в сфере организации морских грузоперевозок подтвердил необходимость разработки интеллектуальной системы для организации морских грузоперевозок в Арктике и субарктической зоне. Базовый компонент интеллектуальной системы - это блок нечеткого вывода для модуля расчета эффективности организации морских грузоперевозок в арктических условиях. Система нечеткого вывода содержит базу правил нечетких продукций, реализовывает нечеткий вывод заключений на основе условий, представленных в форме нечетких лингвистических высказываний. Лингвистические переменные составляются из описания признаков навигации, определяются термины. Представлена обобщенная схема системы нечеткого вывода. Разработана модель в среде Matlab Fuzzy Logic Toolbox. При разработке системы нечеткого вывода для модуля расчета эффективности организации морских грузоперевозок в арктических условиях используются аналитические методы исследования, а также компьютерного моделирования и экспериментальные исследования. Следующим этапом работы над модулем расчета эффективности организации морских грузоперевозок в арктических условиях будет разработка нечеткой нейросетевой модели в системе визуального моделирования Simulink. Таким образом, при реальных входных данных на выходе обученной нечеткой нейронной сети получаем схему наиболее эффективного использования флота.

**Ключевые слова:** морские грузоперевозки, Арктика и субарктика, системы нечеткого вывода, арктическая навигация, нечеткая логика, нейронные сети, компьютерное моделирование, интеллектуальные информационные технологии

## METHOD OF ESTIMATION OF EFFICIENCY OF ARCTIC SHIPPING WITH THE USE OF FUZZY NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES

**Evgenia Yu. Sobolevskaya**

Senior lecturer of department of Information systems and technologies  
Vladivostok State University of Economics and Service  
41, Gogolya str., Vladivostok, 690014, Russia  
tel. +7(914) 656 -57-37, e-mail: study\_z@list.ru

**Sergey V. Glushkov**

Professor, Dr. Sci. Tech.  
Dean of the Electromechanical faculty  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: +7 (964) 443-32-53, e-mail: gluskov@msun.ru

**Natalia G. Levchenko**

Cand. Sci. Tech  
Associate professor of department of Automatic and information systems  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel. +7 (914) 685-99-21, e-mail: levchenko@msun.ru

**Abstract**



The analysis of existing software and information resources in the field of organization of sea cargo transportation has confirmed the need to develop an intelligent system to organize sea cargo transportation in the Arctic and the subarctic zone. The basic component of the intelligent system is a block of fuzzy inference for the module for calculating the effectiveness of the organization of sea cargo transportation in arctic conditions. The system of fuzzy inference contains the base of fuzzy production rules, implements fuzzy inference of conclusions based on conditions presented in the form of fuzzy linguistic statements. Linguistic variables are compiled from the description of navigation signs, the terms are defined. A generalized scheme of the fuzzy inference system is presented. A model is developed in Matlab Fuzzy Logic Toolbox. When developing a fuzzy inference system for the module for calculating the efficiency of the organization of sea cargo transportation in arctic conditions, analytical methods of research, as well as computer simulations and experimental studies are used. The next stage of work on the module for calculating the effectiveness of the organization of sea cargo transportation in the Arctic will be the development of a fuzzy neural network model in the Simulink visual modeling system. Thus, with real input data, we get a scheme for the most efficient use of the fleet at the output of a trained fuzzy neural network.

**Key words:** sea cargo transportation, Arctic and subarctic, systems of fuzzy inference, arctic navigation, fuzzy logic, neural networks, computer modeling, intelligent information technologies

### Введение

Государственная программа РФ по развитию Арктической зоны и субарктической зоны Дальнего Востока указывает на необходимость использования эффективной системы управления и модернизации инфраструктуры региона, для которой важную роль играет высокопроизводительная организация морских грузоперевозок, что, в свою очередь, требует разработки интеллектуальной информационной системы управления [1].

Проведенный анализ существующих программных средств и информационных ресурсов в сфере организации морских грузоперевозок подтвердил необходимость разработки принципиально новой интеллектуальной системы для организации морских грузоперевозок в Арктике и субарктической зоне в целом. [2].

#### 1. Система нечеткого вывода

Основной подход в подобной разработке заключается в неизбежности применения интеллектуальных технологий, таких как нейронные сети, математический аппарат нечеткой логики, для того чтобы учесть наибольшее количество показателей имеющих качественный, неточный или размытый характер, участвующих и влияющих на процесс Арктической и субарктической грузоперевозки.

Базовый компонент интеллектуальной системы – это блок нечеткого вывода для модуля расчета эффективности организации морских грузоперевозок в арктических условиях.

Системы нечеткого вывода предназначены для преобразования значений входных переменных процесса управления в выходные переменные на основе использования нечетких правил продукций. Для этого системы нечеткого вывода должны содержать базу правил нечетких продукций и реализовывать нечеткий вывод заключений на

основе посылок или условий, представленных в форме нечетких лингвистических высказываний. [3]

Так как система нечеткого вывода преобразовывает значения входных переменных в выходные переменных на основе правил нечеткого условного вывода, тогда процесс перехода включает [1]:

- 1) формирование базы знаний, в том числе с использованием знаний экспертов в данной области;
- 2) фазификация;
- 3) формирование правил для базы знаний; дефазификация.

4) С помощью системы нечеткого вывода связываются воздействующие входные параметры и логические правила, используя базу знаний, сформированную экспертами.

База правил для нечеткого вывода формируется на основе знаний экспертов в данной предметной области.

Для решения процесса перехода, такого как фазификация, для расчета эффективности организации морских грузоперевозок в арктических условиях необходимо выделить:

- лингвистические переменные и их термы;
- параметрическую функцию принадлежности.

Необходимо определить, что является входными параметрами модуля расчета эффективности организации морских грузоперевозок в арктических условиях. Основной целью повышения эффективности является минимизация стоимости доставки с учетом не нарушения графика. Необходимо выделить основные классификационные факторы и их весовые коэффициенты. Основной входной параметр – это навигация, который формируется для каждого фактора и входит в развернутую таблицу с показателями, например, как показано в Таблице 1 [1].

Таблица 1

**Показатели навигации в зависимости от сезона и района плавания**

Критерий оценки	Сезон – Район плавания №п																			
	декабрь	январь	февраль	март	апрель	май	декабрь	январь	февраль	март	апрель	май	декабрь	январь	февраль	март	апрель	май		
	очень низкий					низкий					высокий					очень высокий				
Торосистость	0 баллов					1,25 баллов					2,5 балла					5 баллов				
Сплоченность льда	0 баллов					2.5 балла					5 баллов					10 баллов				
Форма льда	Блинчатый лед					Блинчатый лед					Блинчатый лед					Блинчатый лед				
	Тертый лед, ледяная каша					Тертый лед, ледяная каша					Тертый лед, ледяная каша					Тертый лед, ледяная каша				
	Мелкобитый лед					Мелкобитый лед					Мелкобитый лед					Мелкобитый лед				
	Крупнобитый лед					Крупнобитый лед					Крупнобитый лед					Крупнобитый лед				
	Обломки ледяных полей					Обломки ледяных полей					Обломки ледяных полей					Обломки ледяных полей				
	Большие ледяные поля					Большие ледяные поля					Большие ледяные поля					Большие ледяные поля				
	Обширные ледяные поля					Обширные ледяные поля					Обширные ледяные поля					Обширные ледяные поля				
	Гигантские ледяные поля					Гигантские ледяные поля					Гигантские ледяные поля					Гигантские ледяные поля				
	Припай, куски айсбергов или несяки					Припай, куски айсбергов или несяки					Припай, куски айсбергов или несяки					Припай, куски айсбергов или несяки				
	Айсберги					Айсберги					Айсберги					Айсберги				

Также следует привести признаки каждого параметра навигации, что в дальнейшем поможет при формировании диапазона значений для терм лингвистических переменных.

Описание и классификационные признаки приведены в Таблице 2 [4].

Таблица 2

Навигация	
Описание	Классификационные признаки
Сезон	Зима-Весна
	Весна-Лето
	Лето-Осень
Возраст льда	Начальные виды льда
	Нилас, склянка <10см
	Молодой лед 10-30 см
	Серый лед 10-15 см
	Серо-белый лед 15-30 см
	Однолетний лед 30-200 см
	Тонкий однолетний лед первой стадии 30-70 см
	Тонкий однолетний лед второй стадии 50-70 см
	Однолетний лед средней толщины 70-120 см
	Толстый однолетний лед > 120 см
	Остаточный однолетний лед 50-180 см
	Двухлетний лед 180-280 см
Многолетний лед > 300 см	
Торосистость	0-5 баллов
Сплоченность льда	0-10 баллов
Форма льда	Блинчатый лед - 0
	Тертый лед, ледяная каша < 2 м
	Мелкобитый лед 2 - 20 м
	Крупнобитый лед 20-100 м
	Обломки ледяных полей 100 - 500 м
	Большие ледяные поля 500 м -2 км
	Обширные ледяные поля 2 - 10 км
	Гигантские ледяные поля > 10 км
Припай, куски айсбергов или несяки	
	Айсберги

Анализ таблицы показывает, что признаки – это лингвистические переменные, которые свидетельствуют о правильности перехода к математическому аппарату нечеткой логики. Для того, чтобы перейти к следующему этапу разработки интеллектуальной системы, надлежит представить процесс нечеткого условного вывода [1].

Формируются лингвистические переменные для описания признаков навигации. Для признака «Торосистость» определяются следующие термы, как представлено в Таблице 3.

Таблица 3

**Термы лингвистической переменной «Торосистость»**

Диапазон значений	Характеристика термина	Обозначение термина
[0..1.25]	низкий	low
[1.25..2.5]	средний	medium
[2.5..5]	высокий	high

Используется параметрическая Гауссова функция принадлежности (1):

$$\mu(u) = \exp\left(-\frac{(u-b)^2}{2c^2}\right) \quad (1)$$

где b- координата максимума; c - коэффициент концентрации.

По такому же принципу формируются термы для остальных лингвистических переменных навигации: сезон, сплоченность льда, форма льда, возраст льда.

Следующий этап – это формирование базы правил для системы нечеткого вывода. База правил формируется на основе базы знаний, а она, в свою очередь, на знаниях экспертов в данной области.

Формируются правила для группы лингвистических переменных: «Торосистость»,

«Сезон», «Возраст льда». Правило примет следующий вид:

ЕСЛИ «сезон» = «low» И «возраст льда» = «medium» И «торосистость» = «low», ТО «Управляющие воздействие» = «low».

По такому же принципу будут составлены и все остальные правила.

После формирования базы правил осуществляется переход к этапу «Дефаззификация». Используется один из распространенных методов – метод центра тяжести (Center of Gravity).

Проанализировав выше изложенное, можно представить обобщенную схему системы нечеткого вывода (Рис.1).



Рис. 1. Схема системы нечеткого вывода

**2. Разработка модели в среде Matlab**

Далее следует разработка модели в среде Matlab Fuzzy Logic Toolbox с выбором алгоритма нечеткого вывода типа Мамдани и определение входных лингвистических переменных:

- Сезон – «season»;
- Возраст льда – «ice\_age»;
- Торосистость – «hummocking»;
- Сплоченность льда – «ice\_cohesion»;
- Форма льда – «ice\_shape».

Выходам нечеткого вывода являются лингвистическая переменная:

- Время в пути – «у».

Добавив входные переменные, задав их термы лингвистической переменной, например, входного параметра «Торосистость» представлен на панели (Рис. 2).

При задании входных воздействий, определения их функций принадлежности, получается структура нечеткого вывода типа Мамдани, показанная на графике (Рис. 3).

Таким же образом, при помощи редактора правил, формируется база правил нечеткого вывода типа Мамдани (Рис. 4).

В окне интерфейса «визуализации нечеткого вывода» указываются значения входных переменных, для которых выполняется нечеткий логический вывод (Рис. 5).

Был проведен сравнительный анализ результатов эксперимента и показаний эксперта. Основные результаты эксперимента представлены в Таблице 4.

Результаты эксперимента и показания эксперта могут иметь разные значения (мат. ожидание). Результаты эксперимента, в котором используются реальные значения входных величин (лингвистические переменные), базы правил нечеткого вывода и получены соответствующие им конкретные результаты (мат. ожидание), являются обучающими выборками для нейронной сети.

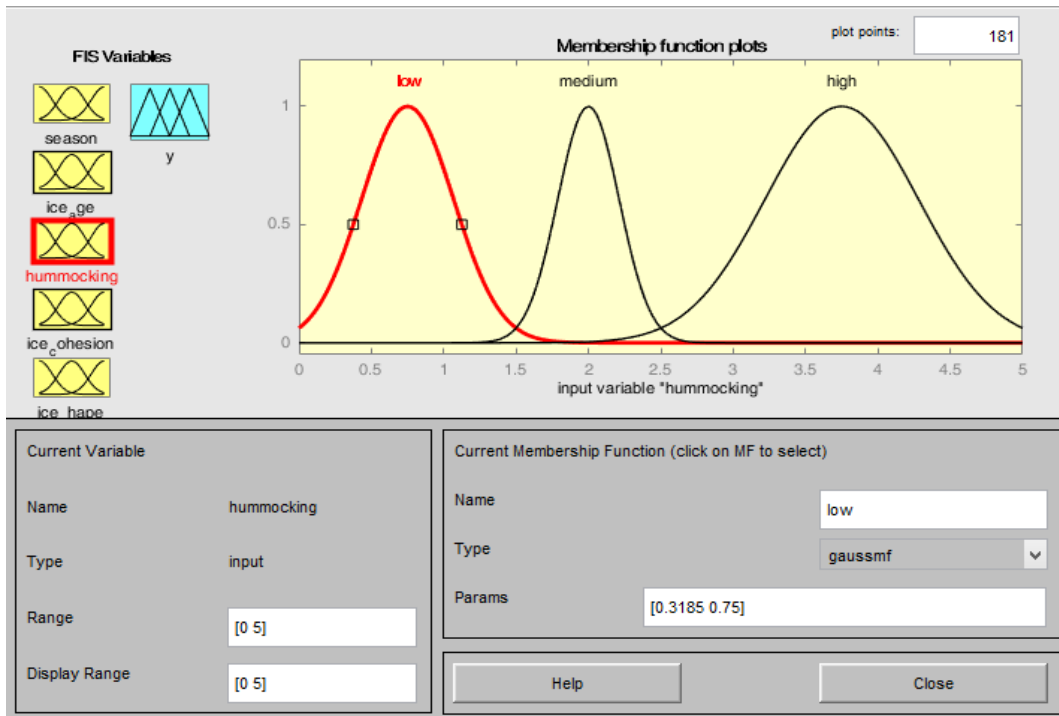


Рис. 2. Входной параметр «Торосистость»

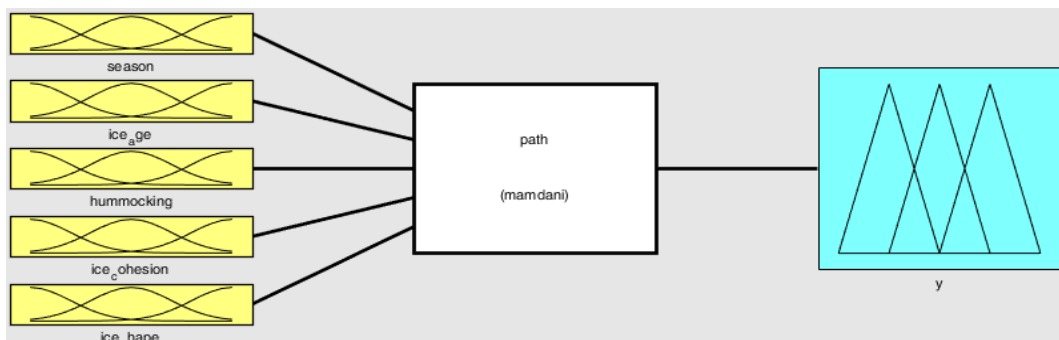


Рис. 3. Структуру нечеткого вывода типа Мамдани

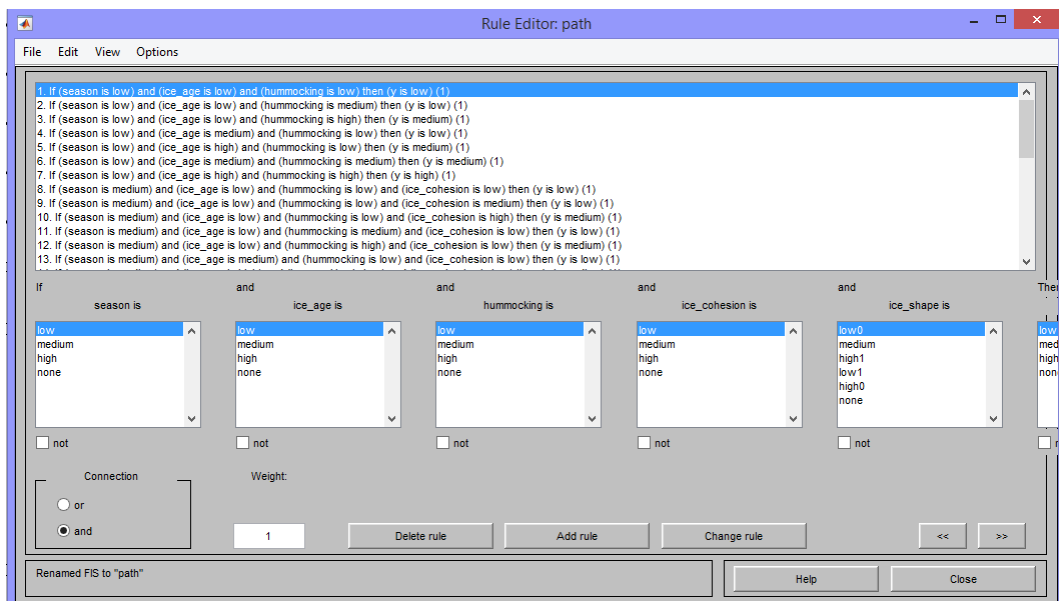


Рис. 4. Базы правил нечеткого вывода типа Мамдани

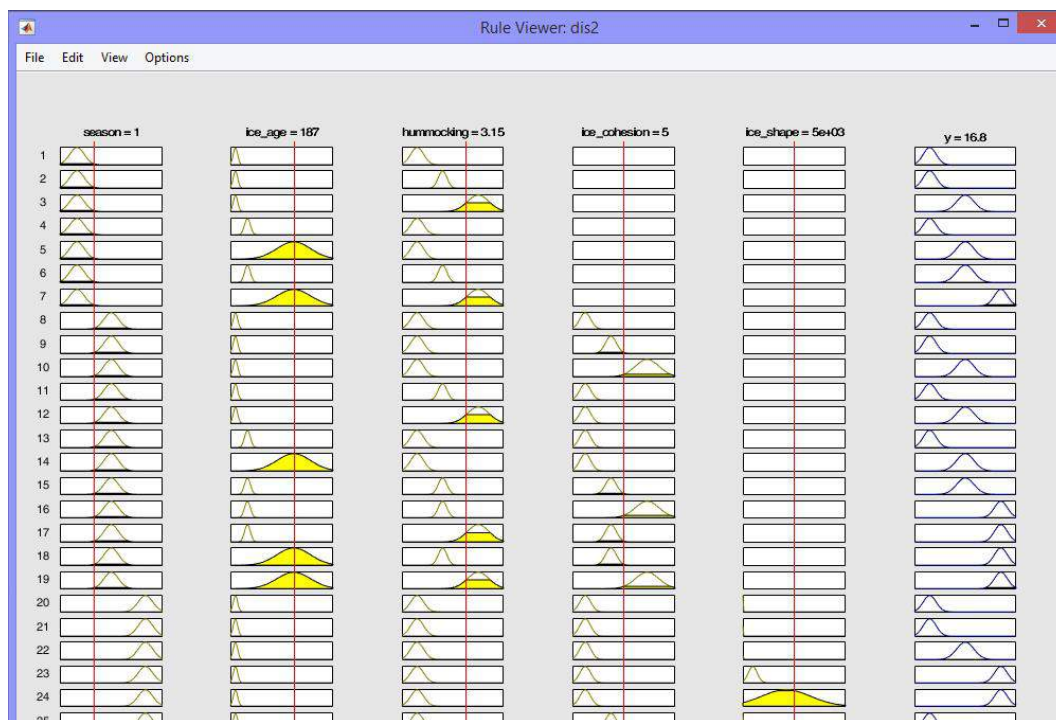


Рис. 5. Визуализация нечеткого вывода типа Мамдани

Таблица 4

Сравнительный анализ эксперимента

Сезон	Навигация		Эксперимент		
Лето-Осень	Возраст льда – [0-30] 	Торосистость – [1.5-2.5] 	Сплоченность льда – [нет]	Форма льда – [нет]	Y=8.63
	Возраст льда – [0-30] 	Торосистость – [2.5-5] 	Сплоченность льда – [нет]	Форма льда – [нет]	Y=11.8
	Возраст льда – [30-70] 	Торосистость – [0-1.5] 	Сплоченность льда – [нет]	Форма льда – [нет]	Y=7.17

**Заключение**

При разработке системы нечеткого вывода для модуля расчета эффективности организации морских грузоперевозок в арктических условиях используются аналитические методы исследования, а также компьютерного моделирования и экспериментальные исследования. Следующим

этапом работы над модулем расчета эффективности организации морских грузоперевозок в арктических условиях будет разработка нечеткой нейросетевой модели в системе визуального моделирования Simulink. Таким образом, при реальных входных данных (табл. 2) на выходе обученной нечеткой нейронной сети получаем схему наиболее эффективного использования флота.

**Литература**

1. Соболевская, Е. Ю. Разработка модуля расчета эффективности организации Арктических морских грузоперевозок с применением нейросетевых технологий // Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России : материалы IX межвузовской науч.-практ. конф. аспирантов, студентов и курсантов. – СПб: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2018. – С. 550–553.
2. Соболевская, Е. Ю., Глушков, С. В., Левченко, Н. Г. Архитектура интеллектуальной системы организации арктических морских грузоперевозок // Моделирование, оптимизация и информационные технологии.

Научный журнал. Выпуск №4(19). 2017. - [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2017/10/Sobolevskaya\\_4\\_1\\_17.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2017/10/Sobolevskaya_4_1_17.pdf)

3. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
4. Sobolevskaya E Yu, Glushkov S V, Levchenko N G and Orlov A P. Development of efficiency module of organization of Arctic sea cargo transportation with application of neural network technologies Journal of Physics: Conference Series V. 1015, may 2018 [Electronic resource] - Access mode: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/4/042057/pdf>

#### References

1. Sobolevskaya, E. YU. “Razrabotka modulya rascheta ehffektivnosti organizacii Arkticheskikh morskikh gruzoperevozok s primeneniem nejrosetevykh tekhnologij” Sovremennye tendencii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii : materialy IX mezhvuzovskoj nauch.-prakt. konf. aspirantov, studentov i kursantov. – SPb: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2018. – P. 550–553.
2. Sobolevskaya, E. YU., Glushkov, S. V., Levchenko, N. G. Arhitektura intellektual'noj sistemy organizacii arkticheskikh morskikh gruzoperevozok. Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii. Nauchnyj zhurnal. Vypusk №4(19). 2017. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2017/10/Sobolevskaya\\_4\\_1\\_17.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2017/10/Sobolevskaya_4_1_17.pdf)
3. Leonenkov, A. V. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH. – SPb.: BHV-Peterburg, 2005. – 736 p.
4. Sobolevskaya E Yu, Glushkov S V, Levchenko N G and Orlov A P. Development of efficiency module of organization of Arctic sea cargo transportation with application of neural network technologies Journal of Physics: Conference Series V. 1015, may 2018 [Electronic resource] - Access mode: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/4/042057/pdf>.

УДК 657.922; 338.517.2

**УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**  
**НАХОЖДЕНИЕ ПОПРАВОК К СТОИМОСТИ ДОЛИ**  
**ПРИ ПРИВАТИЗАЦИИ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**Михаил Владиленович Войлошников**

доктор технических наук, профессор  
главный научный сотрудник

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: 8-914-705-6029; e-mail: michael.vladlen@gmail.com

**Сергей Алексеевич Огай**

доктор технических наук, доцент  
ректор

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел.: (423) 241–49–68; e-mail: ogay@msun.ru

**Валерия Викторовна Кривец**

кандидат экономических наук, доцент  
доцент кафедры Финансы и кредит  
Дальневосточный федеральный университет  
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8  
тел. 8 (423) 265-24-24; e-mail: krivet@mail.ru

**Аннотация**

Оценка стоимости доли участия (пакета акций) основывается на предварительном определении стоимости собственного капитала судостроительного предприятия. Стоимость доли в зависимости от ее размера и от имеющихся остальных долей может быть охарактеризована поправкой к стоимости (премией) за контроль, поправкой к стоимости блокирующей доли, а также скидкой к стоимости миноритарной неблокирующей доли. Имеющиеся рекомендации по нахождению поправок к стоимости доли в целом верно, хотя и приближенно отражают интервалы их значений, поэтому производится уточнение поправок, а также их привязка к размеру доли в структуре долевого совместного капитала. Для определения соотношений между премией к стоимости контролирующей доли, поправкой к стоимости блокирующей доли и скидкой к стоимости миноритарных долей используется условие баланса, при котором стоимость собственного капитала судостроительного предприятия равна сумме стоимостей всех его долей (пакетов акций). При наличии контрольных и блокирующих долей размер скидок к стоимости миноритарных неблокирующих долей является устойчивым на некотором уровне, на котором дальнейшее снижение стоимости могло бы приводить к потере интереса миноритарных собственников судостроительного предприятия.

**Ключевые слова:** стоимость доли, пакет акций, поправка к стоимости, контролирующая доля, блокирующая доля, миноритарная доля, оценка бизнеса, судостроительное предприятие

**THE FINDING OF AMENDMENTS TO THE VALUE OF SHARES  
IN THE PRIVATIZATION OF SHIPYARDS**

**Michael V. Voyloshnikov**

Professor, Dr. Sci. Tech.  
Chief research scientist

Maritime state university named Admiral Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: 8-914-705-6029; e-mail: michael.vladlen@gmail.com

**Sergei A. Ogai**

Associate professor, Dr. Sci. Tech.  
Rector

Maritime state university named Admiral Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel.: (423) 241–49–68; e-mail: ogay@msun.ru

**Valeriya V. Krivets**

Associate professor, Cand. Sci. Economic.  
Associate professor of department of Finance and Credit  
Far Eastern Federal University  
8, Sukhanova st., 690950, Vladivostok, Russia  
tel. 8 (423) 265-24-24; e-mail: krivet@mail.ru



**Abstract**

Estimation of the cost of participation (equity stake) is based on the preliminary determination of the of equity value of shipbuilding yard. The value of share, depending on it size and on the remaining shares, can be characterized by the amendment to the value (premium) for control, an amendment to the value of the blocking share, and the discount to the value of the minority non-blocking share. The existing recommendations for finding of the amendments to the value of share are generally true, although they reflect the intervals of their values approximately, so the amendments are to be clarified, and they are bind to the size of share in the structure of equity joint capital. To determine of the proportions among the premium to the value of the controlling share, the amendment to the value of the blocking share and the discount to the value of minority shares, the balance assumption is used, which in the value of equity of shipbuilding yard is equal to the sum of the values of all its shares (equity stakes). If there are controlling and blocking shares, the amount of discounts to the value of minority non-blocking shares is sustainable at certain level, at which the further decrease in value could lead to a loss of interest of minority owners to participate in the shipbuilding yard.

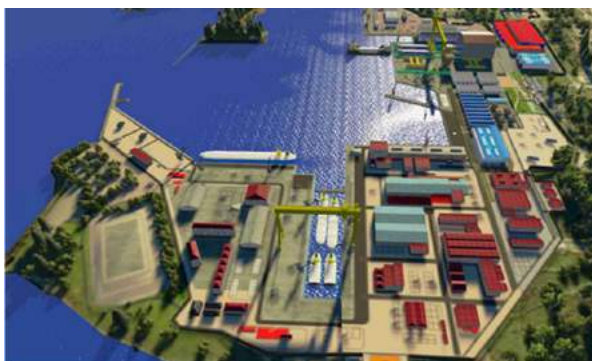
**Key words:** share value, stake, amendment to value, controlling share, blocking share, minority share, business valuation, shipbuilding yard

**Введение**

Процесс организации современного судостроительного производства является многоплановым и помимо обновления и создания судостроительных верфей и заводов охватывает как задачи развития технологии судостроения, так и подготовки кадров и др. На общем уровне технологию постройки судов новых типов, которые требуются по Стратегии развития судостроительной промышленности Российской Федерации на период до 2020 года и на дальнейшую перспективу, по Государственной программе «Развитие судостроения на 2013–2030 годы» и в соответствии с другими решениями, можно охарактеризовать

действующими и планируемыми к созданию верфями и заводами и принципами их взаимодействия.

В отрасли распространено мнение, что серийное судостроение может быть организовано в форме холдингов, в основе которых создаваемые крупные судосборочные верфи (Рис. 1), осуществляющие постройку из модулей, выпускающихся несколькими судостроительными заводами в кооперации, и в этих целях целесообразно изменение «продуктовой линейки» выпуска действующих судостроительных заводов с постройки небольших судов на создание отправляемых на судосборочную верфь модулей серийных судов.



(a)



(б)

Рис. 1. Подразделения судовой верфи АО ДВЗ «Звезда» по постройке крупнотоннажных судов для перевозки сжиженного природного газа в арктических и замерзающих морях (<http://dcss.ru/>)

Нужно заметить, что условия инвестирования и международный рыночный спрос в судостроении оказывают определяющее влияние на состав активов и подразделений судостроительных предприятий, то есть на вид применяемой технологии судостроения.

Для инвестирования в создание новых верфей и в реновацию действующих судостроительных заводов могут использоваться разные источники, как бюджетные, так и корпоративные, а для совместной экономической деятельности наиболее удобны акционерные или иные долевые формы участия.

Кроме этого, целесообразно придерживаться системного подхода и учитывать цикличность на этапе планирования, которая заключается в следующем. Первоначально для развития судостроения используется федеральная поддержка

либо в форме инвестирования в развитие судостроительных предприятий, либо в виде бюджетных субсидий в постройку инновационных судов, например, многоцелевых судов для арктических и замерзающих морей. Усовершенствованные с использованием федеральной поддержки судостроительные верфи и заводы в дальнейшем могут осуществлять серийную постройку судов основных типов, востребованных рынком в условиях конкуренции с зарубежным гражданским судостроением. При этом субсидированные средства федерального бюджета могут быть возвращены и использованы для решения других задач, связанных с развитием экономики и промышленности. Эта цикличность планирования на определенном этапе означает приватизацию созданных верфей и обновленных

судостроительных заводов, а процесс приватизации связан с выкупом долей и пакетов акций корпоративными инвесторами.

Данная работа охватывает разработку методов оценки пакетов акций и долей участия, предназначенных для их использования при определении условий субсидирования и выкупа долей в процессе создания и при приватизации судостроительных холдингов, а также верфей и заводов, являющихся юридически независимыми, созданными с использованием бюджетных субсидий, поскольку выкуп долей (пакетов акций) является общей формой совместного участия в развитии предприятий судостроительной промышленности.

Стоимость доли в бизнесе (пакета акций) судостроительного предприятия зависит от размера оцениваемой доли. С учетом ликвидности долей и степени контроля при определении их стоимости обычно учитываются следующие виды поправок (надбавок и скидок): поправка на контрольный или неконтрольный (миноритарный) характер, поправка за недостаток ликвидности. Надбавка за контролирующий характер пакета обычно применяется только к операционной стоимости компании. 51-процентный пакет акций характеризуется наибольшей надбавкой к стоимости за контроль [2]. Дальнейшее увеличение размера пакета (до абсолютного контроля в 76 %) связано со снижением стоимости доли с учетом миноритарных интересов.

Помимо указанных поправок при определении стоимости долей могут применяться также следующие [9]:

- надбавка к стоимости на качество блокирования для относительно больших миноритарных (неконтрольных) долей, также зависящая от размера доли;
- скидка на потерю ключевой фигуры (например, наследство);
- скидка на структуру портфеля (для двух и более не совпадающих видов действий компаний) и т.п.

#### **1. Задачи, решаемые при нахождении поправок к стоимости долей участия**

К числу факторов, обуславливающих введение надбавок и скидок можно отнести условия, ограничивающие права владельцев контрольных пакетов [8]: эффект распределения собственности, режим голосования, контрактные ограничения.

Нужно заметить, что поправки оказывают воздействие на стоимость доли двояко: во-первых, влияют на стоимость целостного бизнеса и соразмерно на стоимость каждой доли в нем, и во-вторых, на распределение долей в стоимости целостного бизнеса, предварительно оцененного с учетом поправок, указанных выше.

Например, отрицательное совокупное влияние на стоимость бизнеса (имущественного комплекса судостроительного предприятия) может оказывать неудовлетворительная структура долевого участия, препятствующая работе предприятия и доступу участников всех категорий к распределению результатов деятельности. Не затрагивая причины и последовательность возникновения можно было бы привести условной пример такого противоречия долевой структуры: две или три блокирующие доли (каждая размером около 25 % или более от долевого

или акционерного капитала) при наличии совокупности миноритарных неблокирующих долей и при отсутствии контролирующей доли. Подобные варианты структуры капитала судостроительного предприятия могут говорить о проблемах при управлении долевым бизнесом и об излишней конкурентности, когда участники, действуя в своих интересах, не обладают способностью принять общее решение, а объединение участников появления контролирующей доли и в этом примере не предусматривается, так как на этапе такого преобразования могли бы возникнуть противоречия интересов. Подобные противоречия при оценке могут означать необходимость внесения общей поправки, снижающей стоимость целостного комплекса судостроительного предприятия и пропорционально значения стоимости входящих долей.

К пакетам акций закрытых обществ могут также применяться скидки на недостаточную ликвидность. В числе финансовых условий бизнеса, понижающих ликвидность долей участников, обычно приводятся следующие: недоступность или недостаточный размер дивидендов владельцу доли, возможные затруднения или обременения для продажи доли, в том числе, законодательные или административные препятствия. При нахождении ликвидационных скидок к стоимости акций и премиальных надбавок на контролирующий характер пакета оцениваемых акций имеет существенное значение учет возможности государственного регулирования (наличие «золотой акции»).

При определении стоимости доли в бизнесе судостроительного предприятия имеются особенности использования понятия ликвидности и этого термина. Как известно, скидка на недостаточную ликвидность не применяется при нахождении рыночной стоимости объектов. Это требуется при определении ликвидационной стоимости, если объект может быть отчужден за срок экспозиции меньший типичного срока экспозиции для рыночных условий, когда продавец принужден совершить сделку по отчуждению имущества. Чтобы избежать смешивания терминов при определении стоимости долей участников ликвидационная скидка к стоимости пакета акций ниже не используется обозначение скидки на недостаточную ликвидность по указанным основаниям: недоступность дивидендов, затруднения для продажи доли, законодательные или административные препятствия, не связанным с нахождением стандартной ликвидационной стоимости, а применяется понятие и обозначение скидки к значениям стоимости миноритарных долей на их неконтролирующий характер.

При оценке стоимости собственного капитала судостроительного предприятия и внесении поправок к ней, и при оценке стоимости отдельных долей в структуре капитала нужно обратить внимание на различие следующих задач:

- 1) нахождение поправок, применяемых при оценке собственного капитала, оказывающих пропорциональное влияние на стоимость всех его долей, в том числе, поправок к стоимости собственного капитала с учетом качества его долевой структуры;

2) расчет и использование поправок при распределении найденной стоимости собственного капитала на доли с учетом качеств каждой из долей: контролирующей, блокирующих и миноритарных неблокирующих.

В рассматриваемом контексте интересен вопрос о возможности изменения стоимости собственного капитала судостроительного предприятия при вариациях соотношений долей в его структуре. На инновационных этапах инвестиционных проектов при формировании имущественных комплексов судостроительных предприятий, то есть при инвестировании финансовых активов в совокупности реальных активов, как известно, может возникать дополнительная стоимость [1], служащая экономической целью этого инвестирования. Эта дополнительная стоимость, которая соответствует разности стоимости совокупности реальных активов судостроительного предприятия и суммарной стоимости этих активов, взятых по-отдельности, может служить оценкой группового нематериального актива – гудвилла, который с другой стороны обычно связан с понятиями деловой репутации, приверженности клиентуры и т.д., поскольку эти качества возникают как отклик рынка вследствие формирования комплексов реальных активов. В то же время, считается, что финансовые активы при их накоплении не приводят к возникновению дополнительной стоимости, а количество денег просто суммируется. Это верно методически, поскольку стоимость реальных объектов и дополнительная стоимость в группах реальных объектов оценивается в финансовых единицах, которые для этого должны быть номинально суммируемыми как характеристика стоимости. Хотя можно предположить, что денежные суммы при их накоплении могут открывать качественно иные возможности инвестирования и стоимость финансовых средств при этом непропорциональна их сумме, но данная работа опирается на стандартную парадигму, при которой сложение финансовых активов не меняет их стоимостной оценки как суммы в отличие от комплексов реальных активов, которые можно было бы охарактеризовать дополнительной стоимостью, кроме суммы стоимостей частей.

В отношении производных финансовых инструментов – деривативов, таких как ценные бумаги, например, акции или права долевого участия в капитале судостроительного предприятия, по-видимому, лучше придерживаться взвешенных суждений относительно способности тех или иных соотношений их количества оказывать влияние на суммарную стоимость. Сбалансированное суждение может состоять в том, что варьирование соотношений долей участия (пакетов акций) может влиять на стоимость каждой доли, дополнительно повышая или понижая эту стоимость помимо ее пропорциональной величины с учетом размера доли, но суммарное значение стоимости всех долей при варьировании их соотношений меняться не должно, так как при этом не предполагается изменение размера и структуры равной по стоимости совокупности долей контролируемого ими комплекса реальных активов.

Возможны те или иные частные случаи, когда структура долевого участия имеет недостатки, препятствующие совместной деятельности участников и пропорционально понижающие стоимости их долей. В качестве примера выше названо наличие в структуре собственного капитала судостроительного предприятия двух или трех миноритарных блокирующих долей, принадлежащих независимым собственникам, находящимся в конкурентных отношениях, при отсутствии контролирующей доли, что как общий для всех участников недостаток управления может пропорционально понизить стоимость каждой доли, и этот фактор подлежит учету при выполнении оценки собственного капитала (указанная задача 1), а не при распределении найденной стоимости на доли (задача 2).

Способы решения первой задачи изложены в методической литературе [1–3, 8, 9]. Подходы и рекомендации для решения второй задачи – о распределении стоимости собственного капитала судостроительного предприятия между долями, для оценки которого применяются поправки к стоимости контролирующей доли  $x$ , к стоимости блокирующей доли  $y$  и скидки  $z$  к значениям стоимости миноритарных долей на их неконтролирующий характер также рассматривались рядом авторов [4–6, 10–12] и выступают предметом данной работы. При решении второй задачи, то есть, при распределении оцененной стоимости собственного капитала на доли, сумма стоимости всех долей остается неизменной и равной найденной стоимости судостроительного предприятия.

## **2. Нормативные правила и экспертные рекомендации при нахождении поправок**

С целью разностороннего анализа способов оценки влияния размера доли (количества акций) на поправку к стоимости этой доли построен график (Рис. 2) зависимости поправки  $z$  на неконтролирующий характер доли (пакета акций) от ее размера по заданным значениям коэффициента контроля в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 14 февраля 2006 г. № 87 «Правила определения нормативной цены подлежащего приватизации государственного или муниципального имущества», в котором названы величины коэффициента контроля для интервалов значений относительного размера пакета акций: для пакета размером от 1 акции до 10 % минус 1 акция коэффициент контроля составляет 0,6; для пакета размером от 10 % до 25 % акций коэффициент контроля равен 0,7; для пакета от 25 % плюс 1 акция до 50 % акций коэффициент контроля равен 0,8; для пакета от 50 % плюс 1 акция до 75 % минус 1 акция коэффициент контроля составляет 0,9; для пакета от 75 % до 100 % акций коэффициент контроля в соответствии с указанным Постановлением равен 1,0. Коэффициент контроля показывает, во сколько раз цена акции на фондовом рынке меньше в заданном пакете, чем в пакете, дающем абсолютный контроль над предприятием.

Помимо заданных интервалов значений для построения графика учитывается, что стоимость 100 %–й доли равна стоимости собственного капитала в полном размере с нулевой поправкой (без скидки) после внесения при оценке собственного капитала

всех необходимых поправок, связанных с операционной и финансовой деятельностью и инвестиционной структурой капитала, а также поправок на наличие привилегированных акций и др., оказывающих влияние на стоимость бизнеса (имущественного комплекса действующего предприятия), в том числе, по фактору

неудовлетворительной структуры долей участников при которой могут возникать препятствия в работе предприятия, воздействующие на стоимость собственного капитала и, таким образом, пропорционально влияющие на стоимость каждой его доли и др.

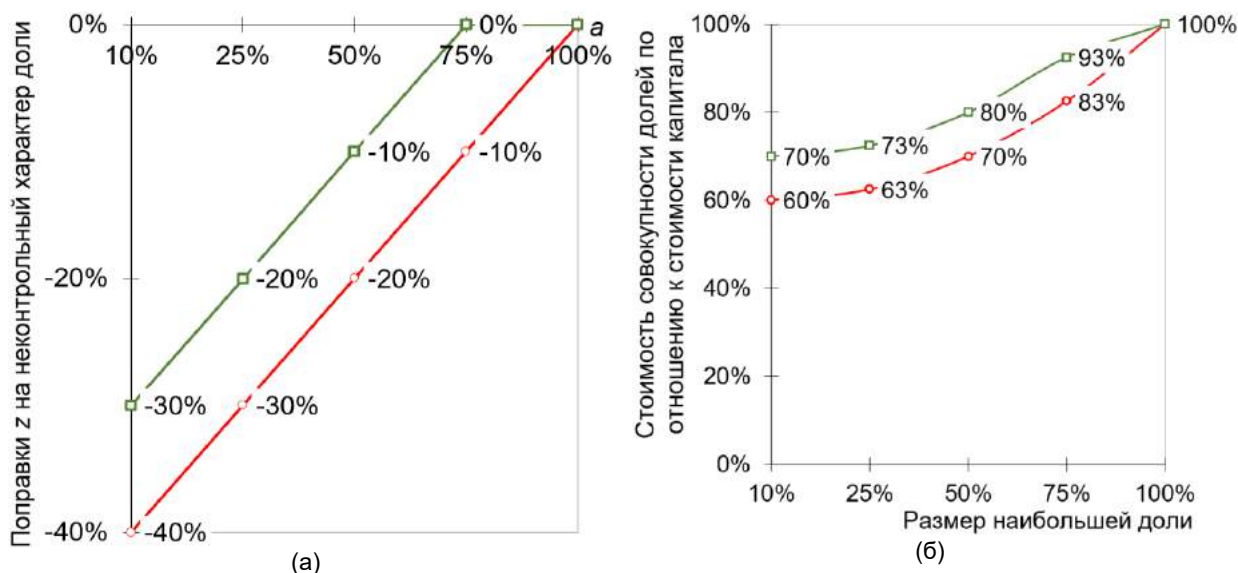


Рис. 2. Зависимости: (а) поправки z на неконтролирующий характер доли, оцениваемой в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 14 февраля 2006 г. № 87, от ее размера a; (б) стоимости совокупности всех долей по отношению к стоимости капитала в зависимости от размера наибольшей доли.

Условные обозначения: -- Нижняя граница интервала -- Верхняя граница интервала

По графикам видно, что поправка к стоимости доли согласно Постановлению от 14 февраля 2006 г. № 87 соответствует скидке (Рис. 2 а) даже для контролирующей доли. Не предусматривается положительная поправка к стоимости, и при любой структуре долевого (акционерного) капитала кроме единоличной 100 %-ной собственности сумма стоимости всех долей меньше стоимости собственного капитала судостроительного предприятия (Рис. 2 б), что можно считать методологическим противоречием зависимости коэффициента контроля от размера пакета акций по данному Постановлению.

Рекомендуемые интервалы значений скидок и надбавок, найденные различными авторами, обобщены в работе [12] Научно-практического центра профессиональной оценки, в их числе:

1. Рекомендации Рутгайзера В.М. [9]: средняя надбавка за контролирующий характер пакета акций 40 %, средняя скидка за неконтролирующий характер от 27 до 29 %, общий интервал значений надбавки за контроль от 25 до 75 %, общий интервал значений скидки за неконтролирующий характер от 25 до 50 %.

2. По рекомендациям, указанным в книге Грязновой А.Г., Федотовой М.А. [8]: премия к стоимости акции за контролирующий характер пакета находится в пределах от 30 до 40 %, скидка к стоимости на неконтролирующий характер пакета – около 23%.

3. По данным «Mergerstat Review» (www.mergerstat.com) премия к стоимости акции за

контролирующий характер пакета составляет в интервале от 20 до 40 %.

4. По рекомендациям Маркуса Я.И., Сивца С.А. [6] скидка к стоимости акции на неконтролирующий характер пакета составляет до 25 %.

5. По данным компании Drezdner Kleinwort Venson, осуществлявшей оценку акций «Роснефти», основанным на информации о продаже в 1996–1997 г. акций 21 крупной компании, надбавка к стоимости пакета акций за контроль составляет в интервале от 10 до 65 % (www.nns.ru).

6. Согласно рекомендациям Иванова А.М., Ивановой Н.С., Перевозчикова А.Г. [4] диапазоны значений скидок и надбавок к стоимости акции в пакете составляют: надбавка на контролирующий характер в интервале от 0 до 75 %, скидка на неконтролирующий характер в пределах от 0 до 50 %.

Нужно заметить, что приведенные диапазоны значений поправок к стоимости доли (пакета акций) в некоторых сравнениях попарно подтверждаются, что, по-видимому, можно рассматривать как факторы их достоверности. С другой стороны, эти диапазоны довольно широкие и приводятся вне зависимости от размера доли и от наличия в структуре капитала иных долей, что является недостатком приведенных рекомендаций.

Зависимости суммы надбавок и скидок с учетом размера пакета некотируемых акций открытых акционерных обществ по данным Научно-практического центра профессиональной оценки [12]



приводятся на графике (Рис. 3) для анализа формы этих зависимостей. По графику видно, что наибольшие значения поправок к стоимости соответствуют контрольным пакетам при их размере, близком к 50 % плюс 1 акция. Можно видеть, также, некоторую тенденцию снижения скидок в области «блокирующих» пакетов (доля от 20 до 40 %). С применением рассмотренного графика (Рис. 3 а) его авторами найдены интервалы значений и средние

значения поправок, зависящих от размера доли, которые указаны на следующем графике оцифрованной форме (Рис. 3 б и далее следующие графики). Нужно заметить, что на оцифрованных графиках по оси абсцисс продублированы значения доли 50 % (+) и 50 % (-), которые соответствуют применению положительной и отрицательной поправки к стоимости соответствующей доли.

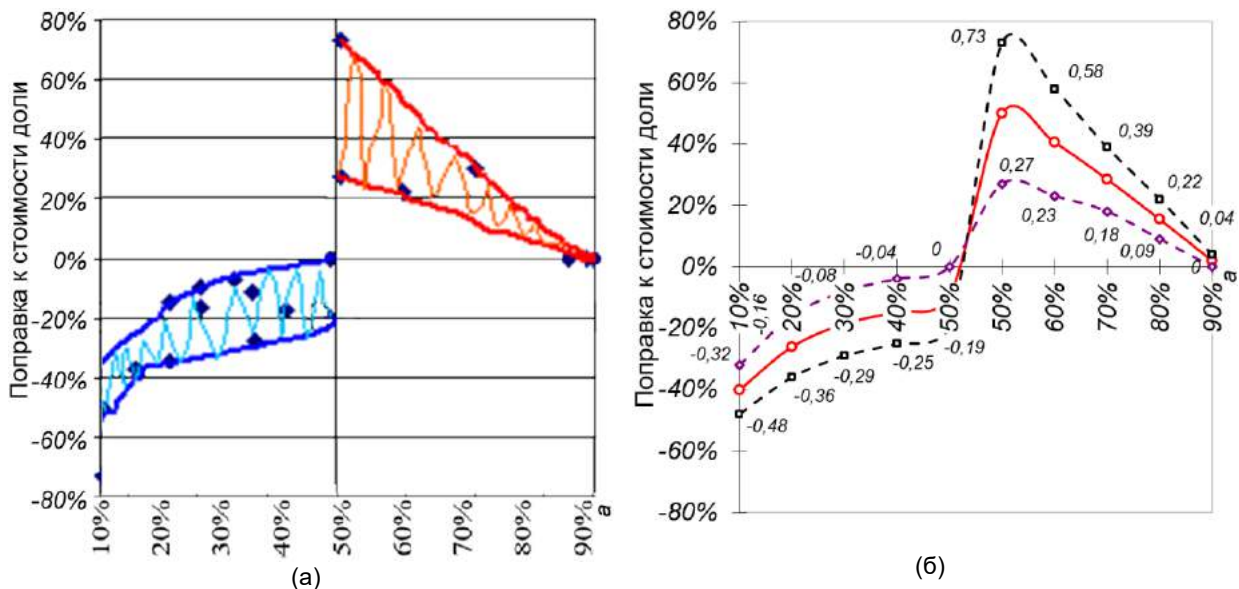


Рис. 3. Зависимость поправки к стоимости доли участия а (пакета некотируемых акций открытых акционерных обществ) по данным Научно–практического центра профессиональной оценки (а) в исходном виде и (б) в оцифрованной форме.

Условные обозначения: —○— среднее —■— наибольшее значение —◇— наименьшее значение

Представленный график (Рис. 3 а и б) характеризует зависимость поправки к стоимости доли (пакета акций) от ее размера, чего нет у выше перечисленных авторов. В то же время, могут возникнуть следующие замечания:

1. Требуется сбалансировать значения поправок таким образом, чтобы сумма стоимости долей (пакетов акций) была равна стоимости собственного капитала судостроительного предприятия, поскольку речь идет о распределении собственного капитала на доли, при этом от долевого структуры капитала не зависят размер и структура комплекса реальных активов, влияющие на стоимость бизнеса. На графиках имеется несоответствие по данному основанию.

В частности, если собственный капитал включал бы две приблизительно равные доли (49 и 51 %), то сумма стоимости долей с учетом их поправок (-0,095 и 0,5) отличалась бы от единицы (100 %) и составляла бы 1,2085, то есть около 121 %, что больше стоимости предварительно оцененного собственного капитала (100 %) и является методологическим противоречием данного выбора поправок к стоимости долей. Причем для приведения в соответствие стоимости собственного капитала суммы обеих приблизительно равных долей (49 и 51 %) поправки стоимости, имеющие противоположный знак, должны быть приближенно равны по величине.

2. Увеличение скидки с уменьшением миноритарной доли затруднительно объяснить. С точки зрения сторон при продаже небольших миноритарных неблокирующих долей в принципе размер доли не должен оказывать заметного влияния на интересы в отношении единицы доли (одной акции). Другими словами, при определении стоимости миноритарные неблокирующие доли можно было бы отнести к единой совокупности, которая характеризуется одинаковой по относительной величине скидкой к стоимости при их оценке, но при отнесении миноритарных неблокирующих долей к этой совокупности, скидка к их стоимости будет зависеть от наличия контролирующей и блокирующих долей. Если в остальной части капитала судостроительного предприятия имеются контролирующая или блокирующие доли, то поправка к значениям стоимости миноритарной доли будет сопоставима с ее стоимостью, которая устанавливается на уровне, ниже которого миноритарные акционеры теряют интерес к участию в инвестировании (в купле–продаже миноритарных долей).

Поправка к стоимости миноритарной неблокирующей доли зависит не столько от размера этой доли, сколько от наличия контролирующей и блокирующих долей в структуре собственного капитала судостроительного предприятия. В частности, если остальная часть собственного

капитала представлена миноритарными долями, а контролирующая и блокирующие доли отсутствуют, то скидка к стоимости каждой миноритарной доли будет нулевой.

По-видимому, форма зависимости скидки от уменьшения миноритарной доли (Рис. 2 а и б) показывает не столько действительное увеличение отрицательной поправки по величине, сколько растущую с уменьшением миноритарной доли погрешность нахождения скидки к ее стоимости. Поскольку погрешность нахождения поправок к стоимости контролирующей и блокирующих долей с другой стороны соответствует находящейся с ними в балансе погрешности определения скидки к стоимости миноритарной неконтролирующей доли. Поскольку миноритарная неконтролирующая доля меньше контролирующей доли и блокирующих, то по относительной величине погрешность нахождения этой скидки к стоимости миноритарной неблокирующей доли увеличивается с уменьшением величины этой доли. Это служит основанием для предположения, что с уменьшением миноритарной доли форма кривых (Рис. 2 а и б) показывает не растущий размер скидки, а увеличивающуюся погрешность ее нахождения.

### 3. Условие баланса стоимости собственного капитала и суммы стоимости его долей

Для устранения рассмотренных противоречий, следует придерживаться условия баланса, при котором суммарная стоимость собственного капитала после введения всех необходимых поправок, применяемых при его оценке, связанных с операционной, финансовой и инвестиционной деятельностью, поправок на наличие привилегированных акций, поправок по фактору неудовлетворительной структуры долей участников при которой могут возникать затруднения, воздействующие на стоимость собственного капитала судостроительного предприятия и, таким образом, пропорционально влияющие на стоимость каждой его доли и других корректировок соответствует стоимости всех долей в структуре собственного капитала (100 % акций)

$$(1+x) \times a + (1+y+z) \times b + (1+z) \times (1-a-b) = 1, \tag{1}$$

где  $a$  – контролирующая доля (размер контрольного пакета), составляющая обычно более 50 % акций или ½ части дольщиков, в рассматриваемых формулах и на графиках при отсутствии контролирующей доли переменная  $a$  обозначает текущее значение доли в бизнесе;  $b$  – совокупность миноритарных блокирующих долей, размер блокирующей доли обычно более 25 % акций или более ½ части дольщиков;  $(1-a-b)$  – совокупность миноритарных

неблокирующих долей, то есть суммарный размер всех долей помимо контролирующей и блокирующих;  $x$  – поправка по относительной величине к стоимости контролирующей доли (премия за контроль);  $y$  – поправка к стоимости блокирующих долей;  $z$  – поправка к значениям стоимости миноритарных долей, имеет отрицательный знак и служит скидкой к стоимости доли. При учете поправок к стоимости в уравнении (1) соблюдается следующее правило: поправка на контроль учитывается при нахождении стоимости контролирующей доли, для блокирующих миноритарных долей учитываются поправки на блокирующий характер и скидка к стоимости на неконтролирующий характер доли, для неблокирующих миноритарных долей учитывается скидка к стоимости на неконтролирующий характер доли.

При определении поправок к стоимости доли для нахождения поправок на контроль  $x$ , на учет блокирующего свойства  $y$  и скидки  $z$  на неконтролирующий характер уравнение баланса (1) преобразуется к виду

$$x = \frac{-z \times (1-a) - y \times b}{a}, \quad y = \frac{-z \times (1-a) - x \times a}{b}$$

$$\text{и } z = \frac{-x \times a - y \times b}{1-a}. \tag{2}$$

При более простой структуре собственного капитала судостроительного предприятия, в предположении, что отсутствуют блокирующие доли ( $y = 0$ ), а имеются: контролирующая доля и миноритарные доли, уравнение баланса (1, 2) принимает вид

$$(1+x) \times a + (1+z) \times (1-a) = 1, \tag{3}$$

то есть  $z = a \times x / (a-1)$ , или  $x = z \times (a-1) / a$ .

На графиках (Рис. 3 а и б) уравнение баланса (3) используется для оценки соответствия поправок к стоимости контролирующей доли по данным Научно-практического центра профессиональной оценки [12] и скидки к стоимости миноритарных неблокирующих долей, значения, которых, выше показаны на графике (Рис. 4). Зависимость поправок по указанным данным поочередно совмещена с уравнением баланса (4) на участке надбавок (Рис. 4 а), для которых на этом графике найдены согласованные значения скидки, являющиеся решениями уравнения баланса, при которых сумма стоимости контролирующей и миноритарных долей равна оценке собственного капитала, и на участке скидок (Рис. 4 б), что дает значения надбавки за контроль, согласованных со значениями скидки на неконтролирующий характер.

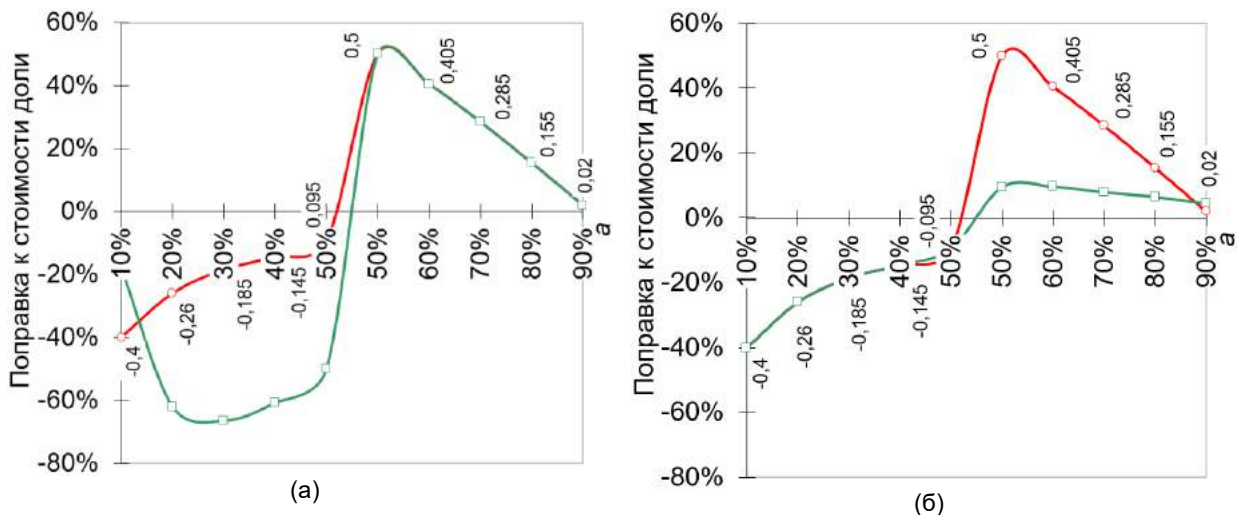


Рис. 4. Совмещение данных Научно–практического центра профессиональной оценки на участках: (а) поправок к стоимости доли на контроль и (б) скидок на неконтролирующий характер доли

Условные обозначения:

- Данные Научно–практического центра профессиональной оценки
- Согласованные значения надбавки и скидки

Поскольку зависимость скидок на неконтролирующий характер миноритарной доли (Рис. 4 а и б), по-видимому, показывает увеличение погрешности нахождения скидок при уменьшении размера доли, а не растущую скидку, которая в совокупности неблокирующих малых миноритарных долей, вероятно, не зависит от размера каждой доли, поскольку зависит от структуры остальной части капитала, то есть от наличия и размеров контролирующей и блокирующих долей, то логично использовать для определения скидки к стоимости взаимозависимость ее и надбавки к стоимости доли иной категории, в частности, надбавки к стоимости контролирующей доли, как показано на графике (Рис. 4 а).

С учетом условия баланса (1–3), при котором сумма стоимости всех долей равна стоимости собственного капитала, используя данные Научно–практического центра профессиональной оценки о размере поправок к стоимости контролирующей доли, можно найти согласованные значения скидки к стоимости миноритарной доли, что тоже показано на графике. Имеющееся расхождение графиков может говорить о погрешности определения поправок к стоимости в зависимости от размера доли (Рис. 3 а).

Для оценки предположения о том, что зависимость скидки к стоимости миноритарных долей, растущая с уменьшением размера доли, более характеризует увеличение погрешности нахождения скидки, чем величину скидки, построены графические зависимости скидок за неконтролирующий характер миноритарной доли, найденных с использованием уравнения баланса (3) согласованно при вариациях значений поправки к стоимости контролирующей доли, задаваемых в форме отступлений от заданных значений (Рис. 5).

Построенные графические зависимости показывают, что варирование отступлений надбавки к стоимости контролирующей доли соответствует значительным вариациям согласованных с ней скидок за неконтролирующий характер миноритарной доли. Это может служить подтверждением того, что растущая зависимость

скидки к значениям стоимости с уменьшением размера миноритарных неблокирующих долей более характеризует увеличение погрешности нахождения скидки.

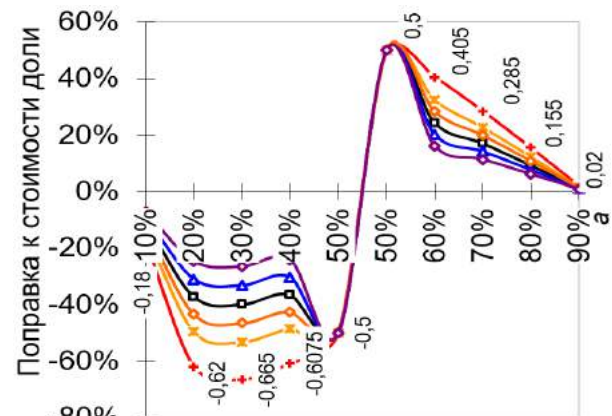


Рис. 5. Зависимости согласованно найденных скидок за неконтролирующий характер доли при вариациях контрольных надбавок

Условные обозначения:

- Согласованные значения надбавки и скидки
- отступление минус 40 %
- отступление минус 50 %
- отступление минус 20 %
- отступление минус 30 %
- отступление минус 60 %

Поскольку нет оснований считать, что скидка к стоимости миноритарных неблокирующих долей (пакетов акций) зависит от их размера, так как зависит от наличия контролирующей и блокирующих долей, то имеет смысл проверить может ли постоянной по величине скидке независимой от размера миноритарной неблокирующей доли удовлетворительно соответствовать согласованная надбавка, найденная с применением уравнения баланса (3). Для ответа на этот вопрос построена совокупность графических зависимостей поправки к



стоимости доли от ее размера (Рис. 6), причем для каждого из графиков размер скидки  $z$  в пределах значений миноритарных долей (от 0 до 50 %) постоянен и не зависит от размера миноритарной доли, а надбавка к стоимости контролирующей доли согласована со скидкой с применением условия баланса (1–3).

По графикам видно, что для значений скидки к стоимости миноритарных неблокирующих долей в интервале от 50 до 70 % (то есть приблизительно от  $\frac{1}{2}$  до  $\frac{2}{3}$ ) при условии независимости скидки от размера миноритарной доли согласованные с применением условия баланса (1–3) значения надбавки к стоимости контролирующей доли с приемлемой точностью соответствуют наблюдаемым данным [12]. Хотя для этого соответствия по этим же данным не потребовалось следовать зависимости скидок к стоимости на неконтролирующий характер от размера миноритарных долей по указанным наблюдениям.

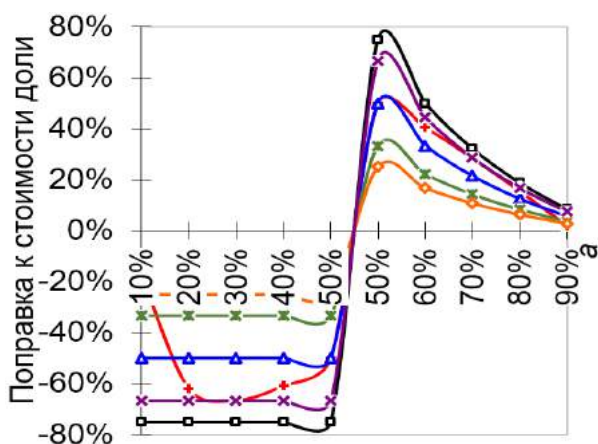


Рис. 6. Зависимости поправки к стоимости доли от ее размера  $a$  при варьировании скидки к стоимости миноритарных долей

Условные обозначения:

- +— согласованные значения надбавки и скидки
- скидка 3/4 на неконтрольный характер доли
- ▲— скидка 1/2 на неконтрольный характер доли
- скидка 1/3 на неконтрольный характер доли
- ◇— скидка 1/4 на неконтрольный характер доли
- ×— скидка 2/3 на неконтрольный характер доли

Соответствие надбавки к стоимости контролирующей доли подтверждает возможность придерживаться скидки к стоимости миноритарной неблокирующей доли в указанном интервале от 50 до 70 %, независимой от размера этой доли, хотя этот интервал значений скидки превышает таковые по некоторым рекомендациям, кроме данных Иванова А.М., Ивановой Н.С., Перевозчикова А.Г. [4], а также данных Научно-практического центра профессиональной оценки [12], которым указанный интервал (от  $\frac{1}{2}$  до  $\frac{2}{3}$ ) значений скидки к стоимости миноритарной доли соответствует.

#### 4. Зависимость поправки к стоимости доли от ее размера

При отсутствии блокирующей доли ( $y=0$ ), поправку  $x$  к стоимости контролирующей доли (премию за контроль) в зависимости от скидки  $z$  к значениям стоимости миноритарных долей и от

размера доли  $a$  можно найти с использованием условия баланса (1–3), как

$$x = -z/a + z, \tag{4}$$

при размере контролирующей доли  $1/2 \leq a < 1$ .

Зависимость поправки  $x$  к стоимости контролирующей доли и скидки  $z$  к стоимости миноритарных долей от этой скидки  $z$  и от размера доли  $a$  показана при отсутствии блокирующей доли в форме функциональной поверхности (Рис. 7).

На полученном графике можно видеть характерную особенность зависимости поправки от размера доли в окрестности линии разрыва функциональной поверхности. Поправка  $x$  к стоимости контролирующей доли вблизи критического для контролирующей доли размера ( $a \approx 1/2$ ) в соответствии с условием баланса (1–3) равна по величине и противоположна по знаку скидке  $z$  на неконтролирующий характер миноритарной доли. Условие баланса соответствует свойству симметрии зависимостей поправок к стоимости от размера доли в окрестности их математических разрывов, а также симметрии зависимостей поправок в остальных интервалах размера доли  $a$  в связанном с этим размером масштабе:  $1 + 1/(a - 1)$ , или  $1 - 1/a$ .

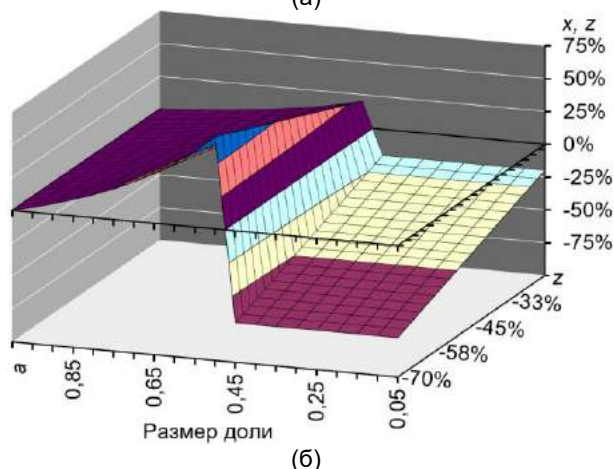
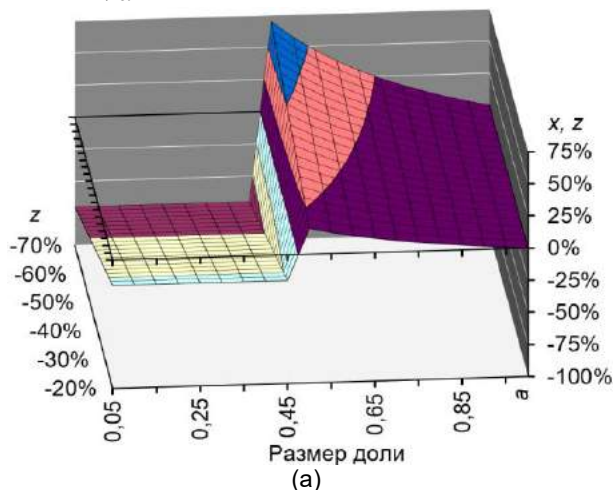


Рис. 7. Зависимость в проекциях (а и б) поправки  $x$  к стоимости контролирующей доли и скидки  $z$  к стоимости миноритарных долей от этой скидки  $z$  и от размера доли при отсутствии блокирующей доли ( $y=0$ )

При отсутствии контролирующей и блокирующих долей ( $x=y=0$ ) скидка к стоимости миноритарных неблокирующих долей соответствует нулю ( $z=0$ ). Предельный размер скидки к стоимости миноритарных неблокирующих долей, связанный с наличием контролирующей и блокирующих долей и соответствующих надбавок к их стоимости, может устанавливаться на уровне, превышение которого привело бы к утрате миноритарными собственниками судостроительного предприятия интереса к долевному участию. То есть, соотношение поправок к стоимости контролирующей и блокирующих долей, с одной стороны, и скидки к стоимости миноритарных неблокирующих долей, с другой стороны, зависит от компромисса интересов сторон и ограничения скидок к стоимости миноритарных неблокирующих долей. С учетом условия баланса (1–3), при котором сумма стоимости всех долей равна стоимости собственного капитала судостроительного предприятия и не допускаются «финансовые пузыри», для рассмотренного примера (Рис. 7) препятствием к увеличению премии к стоимости контролирующей доли выступает предельный размер скидки к стоимости миноритарных неблокирующих долей.

При предположении, что отсутствует блокирующая доля ( $y=0$ ) премию к стоимости контролирующей доли можно найти с использованием условия баланса (1–3) с учетом соответствия интервалу значений от 50 до 70 % скидки  $z$  к стоимости миноритарной неблокирующей доли независимой от размера доли, как

$$x \approx -(50 \div 70\%) \times (a-1) / a, \quad (5)$$

при  $z \approx -(50 \div 70\%)$ ,  $1/2 \leq a < 1$ .

При отсутствии контролирующей доли ( $x=0$ ) поправку  $y$  к стоимости блокирующей доли (Рис. 8) в зависимости от скидки  $z$  к стоимости миноритарных долей и от размера блокирующей доли  $b$  можно найти с использованием условия баланса (1–3), как

$$y = -z/b + z, \quad (6)$$

при размере блокирующей доли  $1/4 < b \leq 1/2$ .

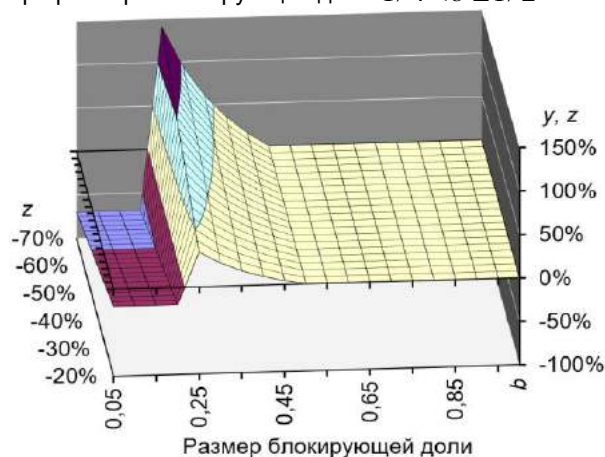


Рис. 8. Зависимость поправки  $y$  к стоимости блокирующей доли и скидки  $z$  к значениям стоимости миноритарных долей от этой скидки  $z$  и от размера блокирующей доли  $b$  при отсутствии контролирующей доли ( $x=0$ )

### 5. Взаимосвязь поправок к значениям стоимости контролирующей и блокирующих долей и скидки к стоимости миноритарной доли

Поправки к стоимости контролирующей  $x$  и блокирующей  $y$  долей в зависимости от частей скидки ( $z = z_x + z_y$ ): части  $z_x$ , связанной с поправкой к стоимости контролирующей доли, и части  $z_y$ , связанной с поправкой к стоимости блокирующих долей, определяются с использованием условия баланса (1–3), как

$$x = -z_x / a + z_x, \quad \text{при } 1/2 \leq a < 1$$

$$y = -z_y / b + z_y + z_x, \quad \text{при } 1/4 < b \leq 1/2. \quad (7)$$

В качестве иллюстративного примера, не углубляясь в его анализ с экономической стороны, для нахождения частей ( $z_x, z_y$ ) скидки  $z$  к стоимости миноритарных неблокирующих долей можно воспользоваться предположением о том, что суммарная поправка ( $y + z$ ) к значениям стоимости миноритарных долей является скидкой, то есть

$$y + z < 0, \quad (8)$$

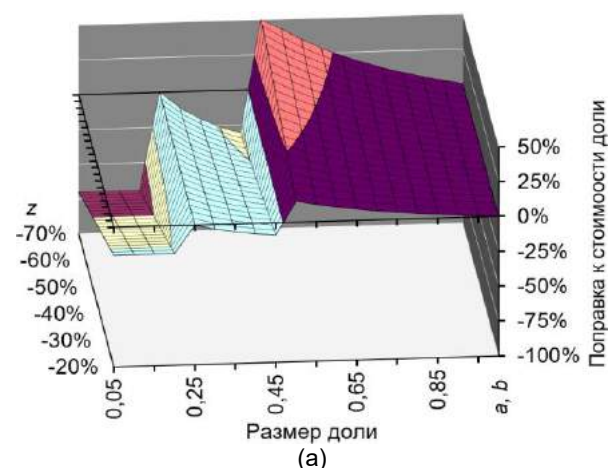
если размер доли (пакета акций) менее 50 %.

Это условие (8) выполняется, если

$$y + z = 0 \quad \text{при } b = 1/4, \quad z_x = z \times 3/4,$$

$$z_y = z/4, \quad \text{соответственно } z = z_x + z_y. \quad (9)$$

Зависимость поправок к стоимости контролирующей доли  $x$ , к стоимости блокирующей доли  $y$  и скидки  $z$  к значениям стоимости миноритарных долей от этой скидки  $z$  и от размера доли ( $a, b$ ) показана в форме функциональной поверхности (Рис. 9).



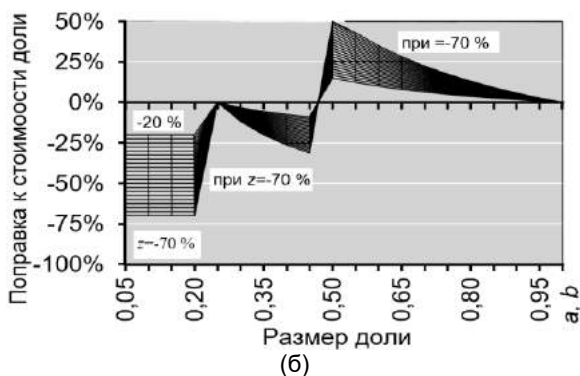


Рис. 9. Зависимость в проекциях (а и б) поправки к стоимости контролирующей доли  $x$ , поправки к стоимости блокирующей доли  $y$  и скидки  $z$  к стоимости миноритарных долей от этой скидки  $z$  и от размера доли ( $a, b$ )

Анализ построенных графиков (Рис. 9 а и б) и использованных при их построении предпосылок (формулы 7, 8 и 9) позволяет прийти к выводам:

- об общем соответствии полученной с использованием условия баланса (1–3) формы зависимости поправки к стоимости доли от размера доли ( $a, b$ ) с данными наблюдений Научно-практического центра профессиональной оценки [11] (Рис. 3 а и б);

- о целесообразности нахождения частей скидки к стоимости миноритарной неблокирующей доли, которые могут служить данными для нахождения поправки к значениям стоимости контролирующей и блокирующих долей в соответствии с условием баланса, при котором сумма стоимости долей участников равна стоимости собственного капитала судостроительного предприятия.

Зависимость стоимости доли от скидки  $z$  и от размера этой доли ( $a, b$ ) показана в форме функциональной поверхности (Рис. 10). По этому графику можно видеть непропорциональный характер изменения стоимости доли (пакета акций) в структуре собственного капитала в зависимости от номинального размера этой доли.

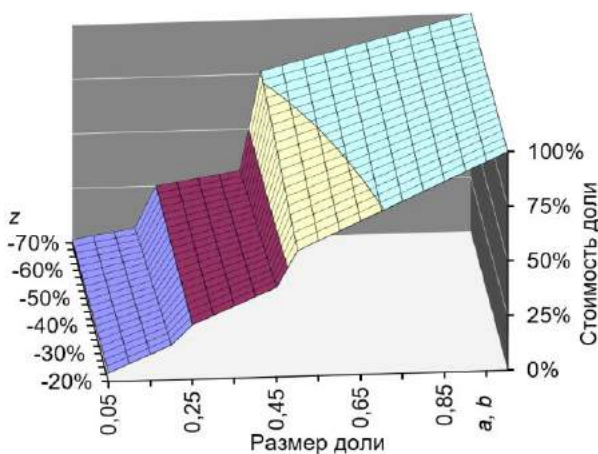


Рис. 10. Зависимость стоимости доли от ее размера ( $a, b$ ) и от скидки  $z$  к миноритарной доле

Поскольку формы зависимостей поправки к стоимости контролирующей и блокирующих долей ( $x$  и  $y$ ) во многом обусловлены скидкой  $z$  к стоимости миноритарной неблокирующей доли, как по размеру этой скидки, так и по соотношению частей в ее составе, а именно: первой части  $z_x$ , связанной с поправкой к стоимости контролирующей доли, и второй части  $z_y$ , связанной с поправкой к стоимости блокирующих долей, то для анализа ниже приводятся графические зависимости (Рис. 11 а и б) поправок  $x$  и  $y$  к стоимости от размера контролирующей или блокирующей доли ( $a, b$ ) в функции от части  $z_x$  скидки  $z$  к стоимости миноритарной неблокирующей доли, а именно от той части скидки, которая в соответствии с условием баланса (1–3, 7) связана с поправкой  $x$  к стоимости контролирующей доли.

Зависимость поправок: к стоимости контролирующей доли  $x$ , блокирующей доли  $y$  и скидки  $z$  к стоимости миноритарной неблокирующей доли от части  $z_x$  этой скидки, связанной с поправкой  $x$  к стоимости контролирующей доли, и от размера доли ( $a, b$ ) для суммарного значения скидки ( $z = z_x + z_y$ ) равного 70 % показана в форме функциональной поверхности (Рис. 11).

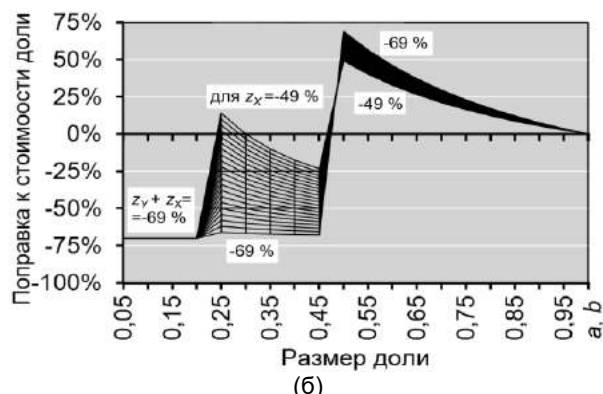
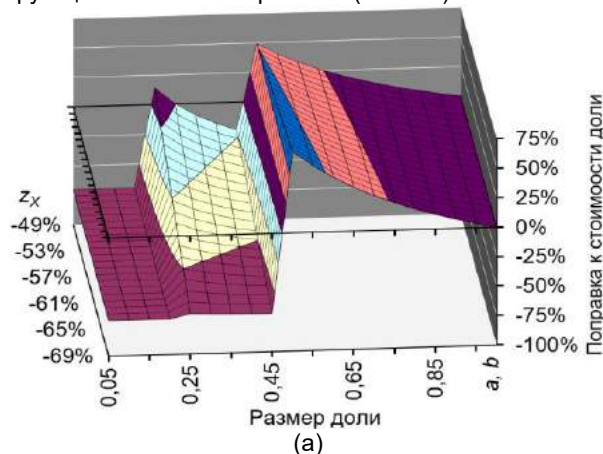


Рис. 11. Зависимость в проекциях (а и б) поправок: к стоимости контролирующей доли  $x$ , блокирующей доли  $y$  и скидки  $z$  к стоимости миноритарных долей от части скидки  $z_x$ , связанной с поправкой  $x$  к стоимости контролирующей доли, и от размера доли ( $a, b$ ) для суммарного значения скидки  $z$ , равного 70 %



Суммарное значение скидки  $z$  к стоимости миноритарных неблокирующих долей для каждого из построенных графиков является постоянным не зависящим от размера такой доли и задано (в рассматриваемом примере 70 %, Рис. 10 а и б). Варьирование части  $z_x$  скидки  $z$  к стоимости миноритарной неблокирующей доли, связанной с поправкой  $x$  к стоимости контролирующей доли в соответствии с условием баланса (1–3, 7), для каждого из этих графиков означает изменение соотношения этой части скидки  $z_x$  и другой части скидки  $z_y$ , связанной с поправкой  $y$  к стоимости блокирующей доли.

Несмотря на то, что показанный пример зависимости поправки к стоимости от размера доли (Рис. 11) освобожден от предположения о том, что суммарная поправка  $(y + z)$  к значениям стоимости миноритарных долей является скидкой, которое ранее использовано в иллюстративном примере (Рис. 8), тем не менее анализ этих зависимостей тоже служит подтверждением общего соответствия формы зависимости поправки к стоимости доли (пакета акций) от размера этой доли с имеющимися данными наблюдений [12] (Рис. 3 а и б), хотя зависимость от размера миноритарной доли поправки к ее стоимости с учетом наличия блокирующих долей и условия баланса (1–3, 7) имеет более сложный вид, чем в указанных наблюдениях, которые по-видимому, отражают не столько зависимость скидки к стоимости от размера миноритарной доли, сколько погрешность определения скидки к стоимости, растущую с уменьшением размера этой доли.

**6. Скидки и поправки к стоимости в зависимости от соотношения размеров долей**

Для обоснованного нахождения поправок к стоимости контролирующей и блокирующих долей представляет интерес возможность соотнесения между собой частей скидки  $z$ : части  $z_x$ , связанной с поправкой к стоимости контролирующей доли, и части  $z_y$ , связанной с поправкой к стоимости блокирующих долей, в пропорции размеров блокирующей и контролирующей долей  $(b/a)$

$$z_y / z_x = b/a. \tag{10}$$

Обе части  $(z_x, z_y)$  скидки  $z$  к стоимости миноритарной неблокирующей доли в пропорции указанного соотношения  $(b/a)$  равны

$$z_y = \frac{z}{1+a/b} \text{ и } z_x = \frac{z}{1+b/a}. \tag{11}$$

При использовании полученных формул (11) совместно с условием баланса (1–3, 7) нужно соблюдать интервалы варьирования соотношения контролирующей и блокирующей долей  $(a, b)$  и их соотношения  $(b/a)$

$$1/3 < b/a < 1, \text{ при } 1/2 < a \leq 1,0 \text{ и } 25\%, \quad 1/4 < b \leq 1/2, \tag{12}$$

а также придерживаться ограничений области определения с учетом совместного варьирования величин контролирующей  $a$  и блокирующей  $b$  долей

$$a+b \leq 1, \tag{13}$$

при котором  $a \leq 1 - z_y/z$ , и  $a > 1/2$ , то есть  $b/(b/a) > 1/2$ .

Зависимость поправки к стоимости контролирующей доли  $x$ , поправки к стоимости блокирующей доли  $y$  и скидки  $z$  к значениям стоимости миноритарных долей от соотношения блокирующей и контролирующей долей  $(b/a)$  и от размера доли  $(a, b)$ , построенная в рамках интервалов варьирования размера доли (12) и ограничений области определения (13) показана в форме функциональной поверхности в указанном выше наблюдаемом интервале суммарного значения скидки  $(z = z_x + z_y)$  от 50 % (Рис. 12 а–в) до 70 % (Рис. 12 г).

Использовать графические функциональных поверхности для оценки поправок к стоимости долей можно следующим образом. При заданных размерах долей  $(a, b)$  найти их соотношение  $(b/a)$ , с учетом заданного уровня скидки  $z$  к стоимости миноритарных неконтролирующих долей выбрать подходящий график в наблюдаемом интервале значения скидки от 50 % (Рис. 12 а–в) до 70 % (Рис. 12 г) и определить поправки: к стоимости контролирующей доли  $x$  и к стоимости блокирующей доли  $y$ , соответствующие условию баланса (1–3, 7) по заданным величинам этих долей и найденному их соотношению.

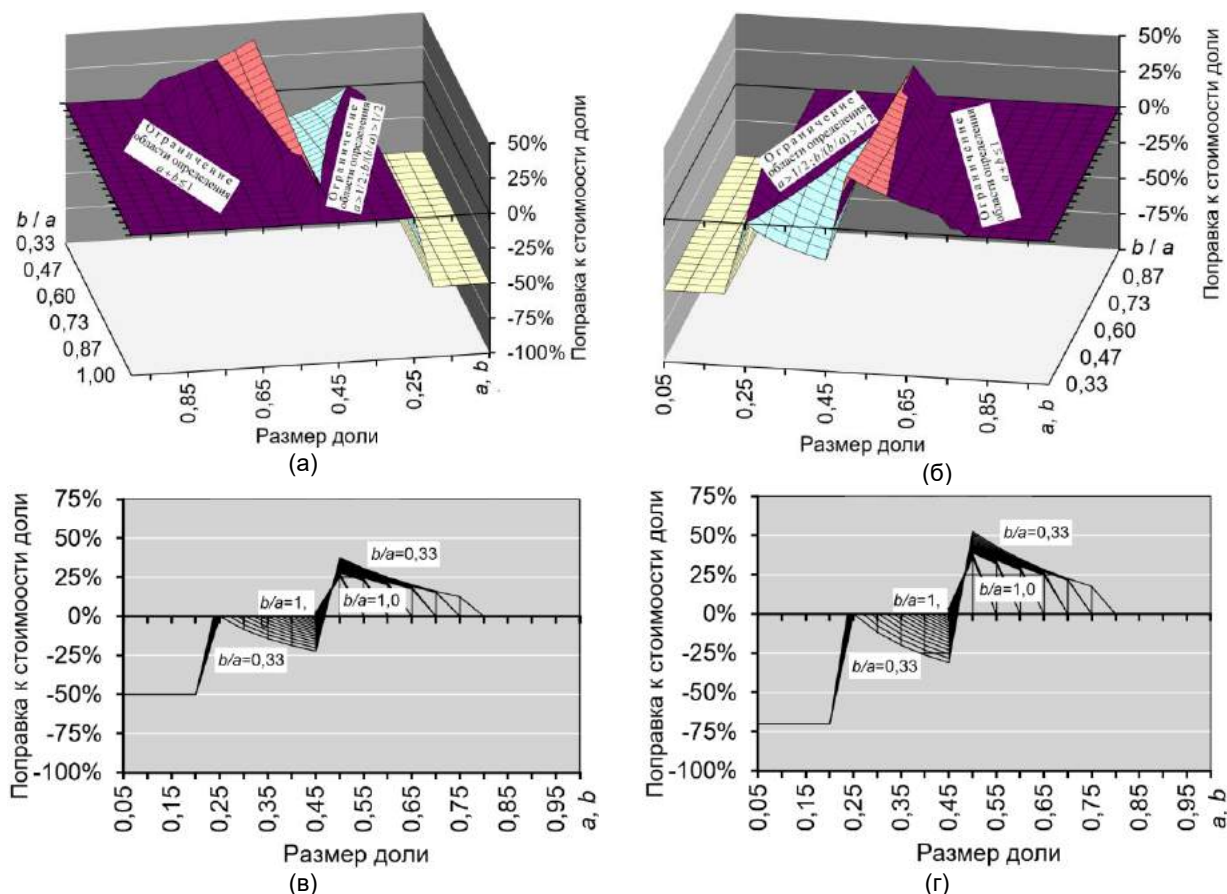


Рис. 12. Зависимость в проекциях (а, б и в) поправки к стоимости доли от соотношения (b/a) блокирующей

и контролирующей долей и от размера доли (а, b) с учетом ограничений области определения этих переменных:  $a + b \leq 1$ ,

при котором  $a \leq 1 - z_y / z$ , и  $a > 1/2$ , то есть  $b/(b/a) > 1/2$  в наблюдаемом интервале суммарного значения скидки z от 50 % (а–в) до 70 % (г)

Помимо графиков можно использовать расчет по формулам (7 и 11) с учетом ограничений (12 и 13) в электронных таблицах по категориям: (a, b) и (b/a), аналогичный выполненному при построении функциональных поверхностей (Рис. 11), при этом в качестве исходного данного вводится значение скидки z к стоимости миноритарных неблокирующих долей, использованный для графиков на границах интервала значений скидки z от 50 до 70 %.

Анализ графических функциональных поверхностей (Рис. 12 а–г) дает возможность видеть, что поправки к стоимости миноритарной доли, как блокирующей в пределах области ее определения, включающей скидку на неконтролирующий характер и надбавку за блокирующий характер (1), так и неблокирующей служат скидками, то есть имеют итоговое отрицательное или нулевое значение.

При определенных сочетаниях блокирующей и контролирующей долей (b/a) с учетом их размера (a, b) поправки к стоимости равны нулю ( $x=y=z=0$ ): на граничном пределе области определения величины b блокирующей доли ( $b/(b/a) = 1/2$ ), за которым возможно появление помимо имеющейся блокирующей доли, также контролирующей ( $a > 1/2$ ), и в случае равенства двух имеющихся долей (

$b/a = 1, b = a$ ), при котором миноритарные доли в структуре собственного капитала отсутствуют.

Поправки к стоимости долей собственного капитала судостроительного предприятия равны нулю, также, при условиях:

- наличия в структуре капитала только миноритарных неблокирующих долей, при отсутствии контролирующей и блокирующих долей;
- наличия в структуре капитала только блокирующих долей, при отсутствии контролирующей и миноритарных неблокирующих долей;
- наличия в структуре капитала только одной доли (100%–ной).

Показанная на графиках (Рис. 12 а–г) зависимость поправки к стоимости доли от ее размера (a, b) и от соотношения размеров блокирующей и контролирующей долей (b/a) основывается на учете следующих предпосылок:

1) сумма стоимости всех долей равна стоимости собственного капитала судостроительного предприятия, а ограничением поправок к стоимости контролирующей и блокирующих долей выступает предельный размер скидки к стоимости миноритарных неблокирующих долей, связанный с ними условием баланса (1–3, 7);

2) предположение (10 и 11) о возможности соотнесения между собой частей ( $z_x, z_y$ ) скидки к стоимости миноритарных неблокирующих долей в пропорции размеров блокирующей и контролирующей долей ( $b/a$ );

3) предельная величина скидки к стоимости миноритарных неблокирующих долей устанавливается на уровне, превышение которого привело бы к утрате миноритарными собственниками интереса к доле к участию, этот уровень зависит от наличия контролирующей и блокирующих долей;

4) размеры блокирующей и контролирующей долей ( $a, b$ ) с учетом их соотношения ( $b/a$ ) находятся в пределах интервалов варьирования и области определения (12 и 13).

За пределами области определения (13), то есть, при отсутствии в структуре собственного капитала контролирующей доли ( $x=0$ ), или блокирующих долей ( $y=0$ ) и при наличии только одной из указанных долей, можно найти поправку к стоимости с использованием условия баланса, преобразованного к виду, который соответствует наличию только контролирующей доли (4) или только блокирующих долей (6).

Для обоснованного нахождения поправок к стоимости контролирующей и блокирующих долей представляет интерес определение структуры скидки к значениям стоимости миноритарных долей, в частности, исследование соотношения частей этой скидки: части, связанной с поправкой к стоимости контролирующей доли, и части, связанной с поправкой к стоимости блокирующей доли, в пропорции размеров контролирующей и блокирующих долей.

#### Выводы и рекомендации

1. Значения поправок к стоимости доли (пакета акций), рекомендуемые рядом авторов (Рутгайзер В.М., Грязнова А.Г., Федотова М.А., Иванов А.М., Иванова Н.С., Перевозчиков А.Г., «Mergerstat Review», Drezdner Kleinwort Benson и др.), в определенных интервалах попарно подтверждаются, что можно рассматривать как фактор их достоверности, в то же время, интервалы значений поправок довольно широкие и приводятся их авторами обычно вне зависимости от размера доли и от наличия в структуре капитала иных долей.

2. Для определения поправки к стоимости контролирующей доли, к стоимости блокирующей доли и скидки к стоимости миноритарных долей нужно придерживаться условия баланса, при котором стоимость найденного собственного капитала судостроительного предприятия равна суммарной стоимости всех его долей (100 % акций), что служит логическим постулатом и подтверждается наблюдениями по имеющимся данным. Условие баланса может быть представлено в форме уравнения с ограничениями, а также словесным правилом или алгоритмом.

3. Помимо методической возможности использования условия баланса для системного определения в совокупностях долей взаимосвязанных поправок к значениям стоимости, условие баланса несет общественную пользу, позволяя оценивать возможность спекулятивных колебаний на фондовых рынках и избегать появления «финансовых пузырей», тем самым, оказывая стабилизирующее влияние на этих рынках.

4. Анализ данных относительно размера надбавки к стоимости контролирующей доли (пакета акций) согласованной с поправкой к значениям стоимости миноритарных неблокирующих долей подтверждает возможность придерживаться значений независимой от размера миноритарной неблокирующей доли скидки к ее стоимости в интервале от 50 до 70 %. При этом поправки к стоимости контролирующей доли и блокирующих долей находятся в зависимости от скидки к стоимости миноритарных долей с учетом условия баланса поправок.

5. Значение скидок к стоимости миноритарных неблокирующих долей, являющееся устойчивым при условии компромисса мотивов собственников контролирующей и блокирующих долей, с одной стороны, и утраты интереса собственниками миноритарных неблокирующих долей к участию в компании, с другой стороны, служит данным при нахождении поправок к стоимости контролирующей и блокирующих долей с учетом условия баланса, при котором суммарная стоимость всех долей равна стоимости собственного капитала судостроительного предприятия.

6. Размер скидки на неконтролирующий характер к стоимости миноритарных неблокирующих долей связан с наличием в структуре капитала судостроительного предприятия контролирующей и миноритарных блокирующих долей, при отсутствии которых скидка на неконтролирующий характер к стоимости миноритарных неблокирующих долей соответствует нулю.

7. Условие баланса, при котором суммарная стоимость всех долей (пакетов акций) равна стоимости собственного капитала судостроительного предприятия, нужно рассматривать не только как методику построения функциональных зависимостей поправок к стоимости от размера этих долей с использованием электронных таблиц, а как подход, доступный к применению в режиме ручного счета или иначе (безотносительно к технике вычислений) для нахождения в зависимости от размера доли поправки к ее стоимости, согласованной с поправками к стоимости и размерами других долей. Если размеры других долей и поправки к ним неизвестны, то использование условия баланса при определении поправки к стоимости в зависимости от размера доли означает соответствие найденной поправки предположению, что иные поправки к стоимости тоже соответствуют условию баланса.

#### Литература

1. Валдайцев С.В. Оценка бизнеса и управление стоимостью предприятия: Учеб. пособие для вузов. – М.: Юнити–Дана, 2002. – 720 с.
2. Десмонд Г.М., Келли Р.Э. Руководство по оценке бизнеса. – М.: Общероссийская общественная организация «Российское общество оценщиков». Академия оценки, 1996.
3. Егоров И.А. Стоимость компании и трансфертное ценообразование. – М.: Портал appraiser.ru, 2003 (www.appraiser.ru)
4. Иванов А.М., Иванова Н.С., Перевозчиков А.Г. Оценка стоимости пакетных инвестиций и долевых



- интересов. Журнал Аудит и финансовый анализ. – М.: Издательский дом «Компьютерный аудит»
1. (<https://www.cfin.ru/press/afa/2000-3/>)
  5. Козырь Ю.В. Влияние стоимости контроля на стоимость акций в составе различных пакетов. – М.: Портал appraiser.ru, 2017. – 58 с. ([www.appraiser.ru](http://www.appraiser.ru))
  6. Маркус Я.И., Сивец С.А. Почём нынче пакеты ? Оценка пакетов акций  
2. (<http://binfo.zp.ua/articles/06.shtml>)
  7. Огай С.А. Модели определения характеристик при создании многоцелевых судов для арктических и замерзающих морей: монография. – Владивосток: Дальнаука, 2018. – 316 с.
  8. Оценка бизнеса : учебник / под ред. А. Г. Грязновой, М. А. Федотовой. – М.: Финансы и статистика, 2009. – 736 с.
  9. Рутгайзер В.М. Оценка стоимости бизнеса. Учебное пособие. – М.: Маросейка, 2007. – 448 с.
  10. Справочник расчетных данных для оценки и консалтинга / Под. ред. Е.Е. Яскевича; СРД № 11, 2012. Научно–практический центр профессиональной оценки (НЦПО). – М: 2012.
  11. Шеннон П. Пратт Оценка бизнеса. Скидки и премии. – М.: Маросейка, 2011. – 412 с.
  12. Яскевич Е.Е. Скидки и надбавки при продаже российских пакетов акций. Оценка влияния привилегированных пакетов акций. – М.: Научно–практический центр профессиональной оценки. (<http://срса.ru/Publications/001/>)

#### References

1. Valdaytsev S.V. Otsenka biznesa i upravleniye stoimost'yu predpriyatiya: Ucheb. posobiye dlya vuzov. – М.: Yuniti–Dana, 2002. – 720 s.
2. Desmond G.M., Kelli R.E. Rukovodstvo po otsenke biznesa. – М.: Obshcherossiyskaya obshchestvennaya organizatsiya «Rossiyskoye obshchestvo otsenshchikov». Akademiya otsenki, 1996.
3. Yegerev I.A. Stoimost' kompanii i transfertnoye tsenoobrazovaniye. – М.: Portal appraiser.ru, 2003 ([www.appraiser.ru](http://www.appraiser.ru))
4. Ivanov A.M., Ivanova N.S., Perevozchikov A.G. Otsenka stoimosti paketnykh investitsiy i dolevykh interesov. Zhurnal Audit i finansovyy analiz. – М.: Izdatel'skiy dom «Komp'yuternyy audit» (<https://www.cfin.ru/press/afa/2000-3/>)
5. Kozyr' YU.V. Vliyaniye stoimosti kontrolya na stoimost' aktsiy v sostave razlichnykh paketov. – М.: Portal appraiser.ru, 2017. – 58 s. ([www.appraiser.ru](http://www.appraiser.ru))
6. Markus YA.I., Sivets S.A. Pochom nynche pakety ? Otsenka paketov aktsiy  
1. (<http://binfo.zp.ua/articles/06.shtml>)
7. Ogai S.A. The models of determining of characteristics of multipurpose ships for Arctic and frozen seas : monograph. – Vladivostok : Dalnauka, 2018. – 316 p.
8. Otsenka biznesa : uchebnyk / pod red. A. G. Gryaznovoy, M. A. Fedotovoy. – М.: Finansy i statistika, 2009. – 736 s.
9. Rutgayzer V.M. Otsenka stoimosti biznesa. Uchebnoye posobiye. – М.: Maroseyka, 2007. – 448 s.
10. Spravochnik raschetnykh dannykh dlya otsenki i konsaltinga / Pod. red. Ye.Ye. Yaskevicha; SRD № 11, 2012. Nauchno–prakticheskiy tsentr professional'noy otsenki (NTSPO). – М: 2012.
11. Shennon P. Pratt Otsenka biznesa. Skidki i premii. – М.: Maroseyka, 2011. – 412 s.
12. Yaskevich Ye.Ye. Skidki i nadbavki pri prodazhe rossiyskikh paketov aktsiy. Otsenka vliyaniya privilegirovannykh paketov aktsiy. – М.: Nauchno–prakticheskiy tsentr professional'noy otsenki. (<http://срса.ru/Publications/001/>)

УДК 656.073

## МЕТОД ОЦЕНКИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ КАБОТАЖНЫХ ГРУЗОВЫХ МОРСКИХ ПЕРЕВОЗОК

**Александр Аркадьевич Исаев**

доктор экономических наук, профессор  
профессор кафедры Международного маркетинга и торговли  
Владивостокский государственный университет экономики и сервиса  
190014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41  
тел.+7(914) 704-82-37, e-mail: isaevalex@list.ru

**Екатерина Сергеевна Мегей**

Аспирант  
Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел. + 7 (914) 703-97-66, e-mail: goldfish-knr@mail.ru

### Аннотация

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 потребительской значимости данной каботажной грузовой морской перевозки как интегрированного продукта; 2) расчет показателя потребительской привлекательности данной каботажной грузовой морской перевозки как интегрированного продукта; 3) расчет показателей потребительской значимости и потребительской привлекательности конкурирующих «интегрированных продуктов»; 4) расчет показателя конкурентоспособности данной каботажной грузовой морской перевозки как соотношения потребительской привлекательности данного «интегрированного продукта» и максимальной потребительской 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**

Dr. Sci. Econ., professor  
Professor of the International marketing and trade department  
Vladivostok State University of Economics and Service  
41, Gogolya str., Vladivostok, 690014, Russia  
tel.+7(914) 704-82-37, e-mail: isaevalex@list.ru

**Ekaterina S. Megey**

post-graduate  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel. + 7 (914) 703-97-66, e-mail: goldfish-knr@mail.ru

### Abstract

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

### Введение

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 потребительской 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», включающего основной продукт и дополнительный.

Целью данной работы является разработка методики оценки конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок судоходной компании как интегрированного продукта на основе эмоциональной теории продаж и квалиметрии.

### 1. Показатели методики оценки конкурентоспособности

Указанная методика включает в себя четыре этапа.

Первый этап. Расчет показателя потребительской 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 потребительской значимости интегрированного транспортного продукта по формуле:  $PЗИП = \sum K_i \times PЗ_i$ , где  $PЗИП$  – показатель потребительской значимости интегрированного транспортного продукта, балл.;  $K_i$  – коэффициент значимости (весомости) данной потребительской характеристики интегрированного транспортного продукта;  $PЗ_i$  – показатель потребительской значимости данной потребительской характеристики интегрированного транспортного продукта, балл. При этом  $\sum K_i = 1,0$ .

Второй этап. Расчет показателя потребительской привлекательности интегрированного транспортного продукта по формуле:  $ППИП = PЗИП / Ц$ , где  $ППИП$  – показатель потребительской привлекательности интегрированного транспортного продукта, балл./руб.;  $PЗИП$  – показатель потребительской значимости интегрированного транспортного продукта, балл.;  $Ц$  – цена перевозки, руб.

Третий этап. Расчет показателей потребительской значимости и потребительской привлекательности интегрированного транспортного продукта судоходных предприятий-конкурентов.

Четвертый этап. Расчет показателя конкурентоспособности каботажной грузовой морской перевозки как интегрированного продукта данного судоходного предприятия по формуле:  $КП = ППИП / ППИП_{max}$ , где  $КП$  – 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.

Разработаны три интервала значений показателей оценки конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок для ценовых диапазонов

- А) низкий ценовой диапазон;
- Б) средний ценовой диапазон;
- В) высокий ценовой диапазон.

Показатель потребительной значимости каботажных грузовых морских перевозок как «интегрированного продукта» (ПЗИП) для каждого из трех ценовых категорий можно рассчитать по следующей формуле

$$ПЗИП = \sum K_i \times ПЗ_i, \text{ баллов.}$$

Соответственно показатель потребительной привлекательности каботажных грузовых морских перевозок как «интегрированного продукта» (ППИП) для трех указанных ценовых категорий можно рассчитать по следующей формуле

$$ППИП_{\text{нцд}} = ПЗИП_{\text{нцд}} / Ц$$

В свою очередь показатель конкурентоспособности каботажных грузовых

морских перевозок как «интегрированного продукта» (КП) для трех ценовых категорий можно рассчитать для низкого ценового диапазона

$$КП_{\text{нцд}} = ППИП_{\text{нцд}} / ППИП_{\text{нцд макс.}}$$

$$\text{для среднего ценового диапазона}$$

$$КП_{\text{сцд}} = ППИП_{\text{сцд}} / ППИП_{\text{сцд макс.}}$$

$$\text{для высокого ценового диапазона}$$

$$КП_{\text{вцд}} = ППИП_{\text{вцд}} / ППИП_{\text{вцд макс.}}$$

## 2. Коэффициенты весомости показателей конкурентоспособности

В Таблице 1 представлены значения коэффициентов значимости (весомости) потребительских характеристик каботажных грузовых морских перевозок с учетом ценового диапазона (категория «Обычный (стандартный) покупатель»).

### Заключение

Предложенные три показателя оценки конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок позволяют создать в морских судоходных компаниях научно обоснованную систему управления конкурентоспособностью перевозок.

Таблица 1

**Коэффициенты весомости потребительских характеристик каботажных грузовых морских перевозок с учетом ценовых диапазонов**

Название потребительской характеристики интегрированного транспортного продукта	Ценовой диапазон		
	Низкий	Средний	Высокий
Защита груза от повреждения в пути следования, K <sub>1</sub>	0,093	0,052	0,023
Сроки и соблюдение сроков доставки груза, K <sub>2</sub>	0,010	0,017	0,023
Экспедирование груза на всех звеньях цепи доставки, K <sub>3</sub>	0,010	0,006	0,023
Охрана груза в пути следования, K <sub>4</sub>	0,010	0,017	0,023
Финансовые услуги (кредитование), K <sub>5</sub>	0,010	0,006	0,023
Специализация предприятия на данном виде перевозки, K <sub>6</sub>	0,010	0,017	0,023
Страхование груза, K <sub>7</sub>	0,010	0,006	0,023
Индивидуальное проектирование погрузки груза, K <sub>8</sub>	0,010	0,006	0,023
Индивидуальное проектирование нескольких вариантов доставки груза, K <sub>9</sub>	0,010	0,017	0,023
Наличие сайта в интернете, K <sub>10</sub>	0,031	0,017	0,023
Расчет ставок в режиме on-line (on-line калькулятор), K <sub>11</sub>	0,010	0,006	0,003
Продвижение компании в интернет-ресурсах, K <sub>12</sub>	0,010	0,006	0,023
Предоставление дополнительных складских услуг по упаковке, K <sub>13</sub>	0,010	0,017	0,023
Услуги перегруза, K <sub>14</sub>	0,010	0,017	0,023
Месторасположение офиса, K <sub>15</sub>	0,031	0,052	0,023
Наличие автомобильной парковки возле офиса для транспорта отправителя, K <sub>16</sub>	0,031	0,052	0,023
Удобный график работы, K <sub>17</sub>	0,031	0,052	0,023
Наличие корпоративной мобильной связи, K <sub>18</sub>	0,031	0,052	0,023
Наличие номера, K <sub>19</sub>	0,010	0,006	0,023
Наличие разрешительной документации, K <sub>20</sub>	0,093	0,052	0,023
Наличие банковского расчетного счета в рублях, K <sub>21</sub>	0,093	0,052	0,023
Наличие собственных складов с предоставлением услуг хранения, K <sub>22</sub>	0,010	0,006	0,008
Наличие собственной широкой технической базы, K <sub>23</sub>	0,010	0,006	0,023
Возможность организации транспортировки различных видов груза (сборные, тяжеловесные, негабаритные), K <sub>24</sub>	0,010	0,017	0,023
Возможность организации доставки грузов двумя и более видами транспорта (мультиmodalность), K <sub>25</sub>	0,010	0,017	0,023
Возможность предоставления персонального менеджера, K <sub>26</sub>	0,010	0,017	0,023
Наличие автоматизированной системы обработки и приема заявок, K <sub>27</sub>	0,010	0,006	0,023

Таблица 1(продолжение)

Название потребительской характеристики интегрированного транспортного продукта	Ценовой диапазон		
	Низкий	Средний	Высокий
Оперативная адаптация к условиям меняющегося рынка, $K_{28}$	0,010	0,017	0,023
Компетентность персонала, $K_{29}$	0,010	0,017	0,023
Соблюдение конфиденциальности, $K_{30}$	0,031	0,052	0,023

#### 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 produkci: 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.

УДК 656.61.052

## КОНВЕНЦИОННЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ НА ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ СУДОВ В МЕЖДУНАРОДНЫХ МОРСКИХ ПЕРЕВОЗКАХ

**Михаил Анатольевич Москаленко**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Теории и устройства судна  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел. +7(902) 4812121, e-mail: asmsh@rambler.ru

**Иван Борисович Друзь**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Теоретической механики и сопротивления материалов  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а  
e-mail: druz\_i\_b@mail.ru

**Владислав Михайлович Москаленко**

курсант  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел. +7-902-481-21-21 e-mail: asmsh@rambler.ru

**Александр Петрович Пурденко**

кандидат технических наук  
доцент кафедры Тактики военно-морского флота и военной истории  
Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. адм. С.О. Макарова  
690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6  
e-mail: pva.877com@mail.ru

### Аннотация

Международная торговля имеет тенденцию к постоянному росту. В настоящее время с развитием информационных технологий и углублением процессов международного разделения труда, связанного с вывозом капитала для целей оптимизации затрат в себестоимости продукции, логистические схемы доставки запасов сырья и полуфабрикатов начинают играть решающую роль для ритмичной работы и развития производства.

Морская судоходная отрасль, доставляющая с наименьшими затратами большую часть товаров на мировом рынке, является на сегодня важнейшей для международной торговли. Наметившийся в последние годы интерес к технологиям создания различных беспилотных аппаратов на транспорте не обошел и сферу судоходства. Тем не менее, исторически сложившийся рынок морских перевозок является очень консервативным, со своими законами и обычаями складывающимися столетиями, что накладывает существенные конвенционные ограничения на внедрение беспилотных судов. В частности, возникает вопрос о возможности эксплуатации беспилотного судна в международных морских перевозках, если бы такое судно появилось на рынке уже сейчас? В статье указанная проблема анализируется авторами с практических позиций.

**Ключевые слова:** беспилотное судно, конвенционные требования, судоходство, ограничения

## CONVENTION RESTRICTIONS ON THE USE OF UNMANNED VESSELS IN INTERNATIONAL MARITIME TRAFFIC

**Mikhail A. Moskalenko**

Dr.Sci.Tech., professor  
Professor of Ship theory and structure department  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel. +7(902) 4812121, e-mail: asmsh@rambler.ru

**Ivan B. Druz**

Dr. Sci. Tech., professor  
Professor of department of Theoretical mechanics and strength of materials  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
e-mail: druz\_i\_b@mail.ru

**Vladislav M. Moskalenko**

cadet  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia



тел. +7-902-481-21-21 e-mail: asmsh@rambler.ru

**Alexander P. Purdenko**

Cand. Tech. Sci.

Associate professor of department of Tactics of the Navy and military history

Pacific Higher Naval School named Admiral S. Makarov

6, Kamskiy pereulok, 690062, Vladivostok, Russia

e-mail: pva.877com@mail.ru

### Abstract

International trade tends to increase. Currently, with the development of information technologies and the deepening of international division of labor associated with the export of the capital for purpose of cost optimization in the cost of production, logistic schemes of delivery of raw materials and semi-finished products start to play a crucial role for smooth operation and development of production.

The Maritime shipping industry, delivering the lowest cost most of the goods on the world market, is today the most important for international trade. In recent years, the interest in technologies of creation of various unmanned transport was not spared and the scope of navigation. However, historically the shipping market is very conservative, with their laws and customs prevailing centuries, and that the question arises about the possibility of unmanned operation of a vessel in international maritime transportation, if such a ship appeared on the market now? In article this problem is analyzed by the authors from the practical point of view.

**Key words:** unmanned vessel, the convention's requirements, shipping, limitations

### Введение

Всемирная торговая организация (ВТО) пересмотрела свой прогноз роста объема мировой торговли до 3,65 % по сравнению с предыдущими оценками в 2,4 %. Основанием для повышения прогнозов стало восстановление объемов азиатских торговых потоков в условиях роста перевозок, а также повышения спроса на импорт в Северной Америке [1]. По словам генерального секретаря международной морской организации ИМО, важнейшую роль здесь играет международное морское судоходство, на которое приходится более 90 % всех перевозок внешнеторговых грузов, так как на сегодня это наиболее рентабельный способ доставки товаров, особенно в межконтинентальном сообщении.

Сегодня морская отрасль – это более 50 тысяч торговых судов зарегистрированных в более чем 150 странах. В этой связи, в современной логистической схеме международной торговли, морской транспорт относят к сфере материального производства, как продолжение производства в сфере обращения товаров. Тем не менее, рынок международных морских перевозок остается одним из самых закрытых, со своими законами, обычаями и обязанностями, строго поделенными между участниками, что накладывает существенные ограничения на внедрение новых технологий и принципиально новых типов судов в процесс перевозок.

С развитием технологий связи и робо-техники наблюдается настоящий бум на различные беспилотные аппараты-самолеты, вертолеты, грузовые и легковые автомобили, и даже поезда. Пришел черед и судоходства, что обещает революцию в процессах доставки грузов морем с переделом судоходного рынка и вхождением в него новых участников, без которых невозможно будет осуществлять процессы доставки грузов. Хотя на сегодня пока нет ни одной конкретной технологии, которая бы изменила или изменит методы работы судоходной отрасли, растет число технологий и решений, которые, похоже, внесут существенные изменения в коммерческое судоходство в ближайшем будущем.

Рабочими инструментами выступающими в этом процессе являются датчики, компьютерные программы автоматизации и роботизированные комплексы на борту судна, а также новые материалы, не загрязняющие окружающую среду и не требующие технического обслуживания.

### 1. Разработки беспилотных судов за рубежом

Но, создание полноценного беспилотного грузового судна является инженерной задачей на порядок сложнее, чем создание какого либо иного транспортного средства, что в первую очередь связано со стоимостью постройки и эксплуатации, а также с гигантскими размерами современных морских судов. Надо учитывать и то обстоятельство, что управлять объектом придется на значительных расстояниях сравнимых с расстояниями между странами и континентами. Современное судно включает в себя сложные системы, механизмы и устройства, вписанные в ограниченное пространство и требующие постоянного технического обслуживания для обеспечения безаварийной работы в сложных погодных условиях на протяжении длительного рейса. Следовательно, для беспилотного судна оборудование, работающее автономно, должно стать сложнее и надежнее с элементами как минимум 2 х кратного резервирования (с учетом исключения рисков внезапного отказа). Следует также учитывать масштабный эффект современных грузовых судов, которые могут быть в тысячи раз дороже беспилотного автомобиля или вертолета. Разумеется, при подобных обстоятельствах невозможно ожидать, что будут специально построены беспилотные суда для проведения натурных испытаний, с целью получить безопасную и надежную во всех отношениях конструкцию. Риски отказа по системе «слабого звена» даже незначительного элемента оборудования при несвоевременном выявлении дефекта способны привести к аварии, которая может иметь непоправимые последствия. Например, для экологии при разливе нефтепродуктов (как это было при катастрофах с танкерами «Эрика» и «Престиж») или от взрыва газа в порту на таком судне может

пострадать целый город. То есть, беспилотное судно, прежде всего, является системой с «неэкономической ответственностью». Эскизные проработки беспилотного судна в основном сформировали архитектурно-конструктивную модель [2] (Рис.1).



Рис. 1. Беспилотное судно [2]

Декларируемая большинством разработчиков архитектуры такого судна «целевая функция» построенная по модульному (взаимозаменяемому) принципу создания сложной технической системы (когда, автоматизированные рабочие модули для судов можно будет унифицировать и выпускать отдельно даже в разных местах, при этом допуская использование технически пригодных модулей с поддержанных судов) по нашему мнению является ошибочным техническим решением, которое несет в себе скрытые угрозы последствий оптимизации для каждого модуля системы (переводя его уже на стадии проектирования в состояние неустойчивого равновесия способного создать опасные неуправляемые состояния при недооценке рисков эксплуатации судна в целом).

Но, в стремлении как можно быстрее спустить на воду «умные суда» крайне важно не забывать о людях – считает генеральный секретарь влиятельного профсоюза моряков Nautilus International, сообщив пред-ста-вителям ИМО, что пренебрежение «человеческим фактором» с точки зрения автономного судоходства может представлять серьезные угрозы безопасности мореплавания и окружающей среде [3].

Тем не менее, многие компании и даже страны уже финансируют разработки в области создания беспилотных судов и плавучих объектов.

Научно-исследовательский проект под названием Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks поддерживаемый Европейской комиссией, например, констатировал, что управляемые суда представляют собой большие риски, чем автономные [4]. Считается, что первое грузовое автономное судно без экипажа появится уже к 2019–2025 году, а к 2030 году таких судов в мире будет более ста. Первые военные разработки беспилотных катеров уже появились. Это Американский противолодочный катамаран Sea Hunter, Израильский катер Seagull, Китайский беспилотный катер администрации морской безопасности [5], строится Российский роботизированный тримаран Тень способный нырять и работать в дальней морской зоне [6]. В России компания Nonius Engineering Ltd занимающаяся строительством земснарядов планирует приступить к проектированию полностью автономной землечерпалки [7]. Между компанией из Великобритании Automated Ships Ltd и технологической корпорацией Kongsberg подписан Меморандум о сотрудничестве по созданию первого

в мире беспилотного и полностью автоматизированного судна для оффшорных операций [8]. Реестр судов Великобритании зарегистрировал в 2017 году первое автономное судно Worker 7 [8]. В Норвегии уже создана первая в мире специализированная компания автономного судоходства Massterly [9]. В гражданских целях Норвежская компания Yara ASA строит два судна внутреннего плавания для перевозки удобрений на расстояние 30 миль [10]. Первое судно появится в 2019 г. и вначале будет работать с сокращенным экипажем, а полностью беспилотным должно стать к 2020 году. Следует отметить, что стоимость такого судна в 3 раза выше стандартного аналога с экипажем и составляет 25 млн. дол. США. Тем не менее, компания заявляет, что при беспилотной эксплуатации затраты по судну будут составлять всего 10 % от стандартного аналога с экипажем. Действительно, более 44 % при эксплуатации морского судна составляют затраты на экипаж [11]. Несмотря на восстановление рынков грузоперевозок, судовладельцы и операторы не готовы увеличить расходы на оплату труда и содержание экипажей, поскольку по-прежнему испытывают серьезные финансовые трудности [12]. Одновременно, из-за нехватки квалифицированных кадров, увеличения рабочей нагрузки, за счет сокращения экипажей на современных автоматизированных судах, загруженности отрасли нормативной базой и проверками со стороны государства порта (в рамках региональных меморандумов) на флоте растет аварийность. По данным крупнейшей Немецкой страховой компании AGCS за 5 лет с 2012 года от 75 % до 96 % аварий на морском флоте случается в результате человеческой ошибки по причине усталости или некомпетентности [13]. По прогнозам к 2025 году мировая судоходная отрасль столкнется также с проблемой дефицита 147000 офицеров торгового флота [14]. Поэтому, очень заманчивыми считаются перспективы разрешить надвигающийся кризис путем сокращения экипажа за счет увеличения степени автоматизации судов, или создать судно вообще без экипажа, тем самым исключив риск ошибок эксплуатации и уменьшив издержки в себестоимости перевозок. На беспилотном судне можно полностью убрать надстройки и рубки улучшив аэродинамику, убрать бытовые системы и оборудование, каюты и изоляцию (улучшив энергоэффективность). Можно исключить спасательное оборудование и снабжение, горючие материалы, перенести системы пожаротушения только в машинные помещения и трюма. Например, «Росатом» создает цифровую модель без экипажного судна для Арктики. Для такой модели стало возможным получить существенные улучшения в конструкции корпуса, отказаться от надстройки, разместить в носовой части грузовой трюм, исключить все системы обеспечения жизнедеятельности экипажа, тем самым увеличив объемы грузовых помещений и даже продлить сроки навигации [15]. При таком подходе, разумеется, резко сократятся эксплуатационные и построечные расходы, возрастет вместимость грузовых помещений против стандартного судна ледового плавания, с учетом ограничений на размеры судна связанные с глубинами арктических морей и

шириной ледокола. Кроме того, считается, что на беспилотные суда не будет пиратских нападений, так как нельзя взять экипаж в заложники с целью выкупа (непонятным остается при этом вопрос противостояния риску возможных хакерских атак для завладения судном и грузом с целью выкупа). Тем не менее, пока такие суда не станут серийными с унифицированным оборудованием на борту, все плюсы в экономическом плане, скорее всего, перечеркнет стоимость эксклюзивного (выполненного по спецзаказу) беспилотного оборудования, его эксплуатационная и сервисная составляющая. По результатам проведенного исследования один из крупнейших мировых портовых и терминальных операторов DP World заявил, что при развертывании автономных грузовых судов могут возникнуть значительные проблемы связанные с безопасностью, и пока непонятно, когда автономные или дистанционно управляемые суда будут в состоянии адекватно справляться с проблемами погоды, навигационными препятствиями и ремонтом в ходе рейса [4].

Научные исследования идут по пути создания 3х типов судов:

- полуавтономных «умных судов» с сокращенным экипажем и автоматизацией;
- полностью автономных судов без экипажа управляемых с берега;
- беспилотных судов с «искусственным интеллектом» способных принимать самостоятельные решения.

Ближе всех к созданию полностью автономных судов приблизилась компания Rolls Royce запустившая в Финляндии эскизный проект в виртуальном исполнении AAWA, в проекте также использована модульная концепция беспилотного судна, электро-двигатель и сжиженный газ как основное экологическое топливо. Аналогичные разработки финансирует Евросоюз, проект получил название MUNIN, исследователи из DNV GL рассматривают возможность запуска беспилотных судов вдоль побережья Норвегии [11,16]. Японские судостроители и морские перевозчики объединяют усилия с целью создания самоуправляемых судов к 2025 году. Mitsui и Nippon Kaisha вкладывают в этот проект около 100 млн. долл. США. Японское правительство намерено включить разработку самоуправляемых судов в систему частно-государственного партнерства, ставя амбициозную цель продвижения японской технологии в качестве международного стандарта [17]. Крупнейший перевозчик руды компания BHP Billiton, перевозящая в год около 250 млн. тонн груза объявила о переходе на беспилотные морские перевозки в ближайшие 10 лет [16].

## 2. Подходы к нормированию безопасности эксплуатации беспилотного судна

Тему беспилотных судов поддержал и Комитет по безопасности на море (КБМ) Международной морской организации ИМО, 99-я сессия которого была проведена 16–25 мая 2018 года [18]. КБМ одобрил основу для аналитического исследования по вопросам нормативного регулирования в рамках ведущейся работы, включая согласование предварительного определения, что есть морские автономные надводные суда и степеней

автономности такого типа судов, а также методологию проведения данного исследования и план работы. Было определено, что под термином «морское автономное надводное судно (MASS)» понимается судно, которое в той или иной степени может функционировать без человеческого участия. Для содействия проведению аналитического исследования степень автономности судна определена следующим образом (с учетом того, что судно может выполнять операции при одной или нескольких степенях автономности в ходе только одного рейса):

- судно с автоматизированными процессами и поддержкой принятия решений (экипаж присутствует на борту для приведения в действие и контроля бортовых систем и функций, при этом некоторые операции могут быть автоматизированы);
- дистанционно управляемое судно с экипажем (действия судна контролируются удаленно из другого места. При этом, экипаж остается на борту);
- дистанционно управляемое судно без экипажа (судно находится под контролем и управляется из другого места. Экипажа на борту нет);
- полностью автономное судно (бортовая система управления операциями судна способна самостоятельно принимать решения и определять порядок действий).

На первом этапе исследования будут определены действующие положения в согласованном перечне документов ИМО и дана оценка того, как они могут или не могут применяться к судам с различной степенью автономности и/или могут ли они исключать операции морского автономного надводного судна (MASS). В качестве второго шага будет проведен анализ для определения наиболее подходящего способа решения проблемы операций судна (MASS) с учетом, в частности человеческого фактора, технологии и операционных факторов. КБМ также предложил заинтересованным государствам-членам и международным организациям представить предложения касающиеся разработки временных руководящих принципов проведения ходовых испытаний судов типа (MASS).

Тем не менее, вопросам конвенционных ограничений для коммерческой практики судов типа (MASS) пока, по нашему мнению, не уделяется должного внимания, что в последствии существенно усложнит выход таких судов на рынок морских перевозок.

В исследовании Еврокомиссии например сказано, что с юридической точки зрения, отсутствие на судне экипажа не является непреодолимым существенным препятствием. И при наличии разумной степени уверенности в том, что беспилотное судно может работать, по крайней мере, так же безопасно, как управляемое во всех его функциональных системах, нет оснований полагать, что правовые рамки не могут быть приведены в соответствие [4].

Тем не менее, на сегодня остро встает вопрос легальности использования беспилотных судов с точки зрения международного морского права. Непонятно кто будет нести ответственность в случае аварии и каким образом применять понятие «общей аварии»? Какие риски подлежат страхованию, будут ли страховые компании или клубы страховать «P&I» риски? Открытым остается вопрос, как отреагируют

морские профсоюзы на потерю работы экипажами судов, ведь со временем под угрозу закрытия попадут и они сами по причине отсутствия моряков-членов профсоюза. В Российском профсоюзе моряков уверены, что на практике реализация такого сложного проекта как беспилотное судно, будет сопряжена с рядом серьезных трудностей и вряд ли представители отрасли откажутся от экипажей в ближайшие 10 лет:

- только персонал, находящийся на борту судна, способен верно оценить ситуацию и принять решение о совершении того или иного маневра. К тому же угрозу представляют и внештатные ситуации, связанные со сбоем электронных элементов управления. В таком случае, только реальный экипаж может вывести судно из аварийного состояния [3].

Не меньше вопросов вызывает и юридический аспект. Так, на сегодняшний день любое судно, находящееся в открытом море без экипажа на борту, считается бесхозным. В соответствии с Конвенцией ООН по морскому праву 1982г. каждое государство в отношении судов, плавающих под его флагом, принимает меры по комплектованию и обучению морских специалистов, а экипаж по уровню подготовки и численности должен соответствовать назначению и размерам судна. Поэтому, любое прибрежное государство, не имея правовой основы, в целях обеспечения безопасности может запретить мирный проход автономному судну. А, на урегулирование правовых вопросов в рамках автономного судоходства по всему миру может уйти не один десяток лет [19]. Представители отрасли также скептически относятся к идее эксплуатации беспилотных судов. Исполнительный вице-президент и главный операционный директор Ardmore Shipping в рамках Лондонской Международной недели морского судоходства 2017 года высказал предположение, что концепция автономных судов может разрушить отрасль. Он отметил, что не верит в широкое распространение беспилотных судов до тех пор, пока эта технология не решит все вопросы, связанные с обеспечением безопасности в отношении пожаров, разливов нефти и потери груза [19].

В данный момент, прежде всего, непонятно, подпадают ли беспилотные суда под существующие конвенционные требования или являются исключением из них? Представляется очень упрощенным подход к выводу таких судов на рынок только с позиций решения вопросов безопасной

эксплуатации и удаленной навигации. Рынок морских перевозок складывался столетиями и является очень консервативным со своими специфическими обычаями, законами и особенностями делового оборота, что накладывает на эксплуатацию беспилотных судов значительный ряд ограничений. Поэтому, для рассмотрения основных вопросов практического использования беспилотных судов в международных морских перевозках следует последовательно проанализировать иерархическую структуру требований к морскому судну, представленную нами на (Рис. 2)

Прежде всего, рассмотрим возможность применения к беспилотнику понятия судна. На сегодня в международной практике нет нормо-дефиниции однозначно определяющей понятие «судно». Понятие раскрывается только применительно к цели конкретного правового акта (конвенции). В некоторых конвенциях понятие судна вообще не определено. Так, например, в соответствии с Международной конвенцией о спасении 1989 г. судно означает любое судно или плавсредство либо любое другое сооружение, способное осуществлять плавание. Афинская конвенция о перевозке морем пассажиров и их багажа 1974 г. относит к судам только морские суда за исключением судов на воздушной подушке. Международная конвенция о гражданской ответственности за ущерб от загрязнения нефтью 1969 г. понятие судно определяет как любое морское судно и плавучее средство любого типа, фактически перевозящее нефть наливом в качестве груза. Международная конвенция об унификации некоторых правил о коносаменте 1924 г. устанавливает, что судно это любое судно, используемое для морской перевозки грузов. В Международной конвенции об условиях регистрации судов, под судном понимается любое самоходное судно, используемое в международной морской торговле для перевозки грузов, пассажиров или того и другого, за исключением судов валовой вместимостью менее 500 регистровых тонн. Под понятие морские суда по смыслу Женевской конвенции о международном режиме морских портов 1923 г. подпадают все суда, принадлежащие по праву собственности государству или частным лицам или управляемые ими, за исключением военных кораблей или судов, служащих для выполнения полицейских и административных функций, либо рыболовных судов.

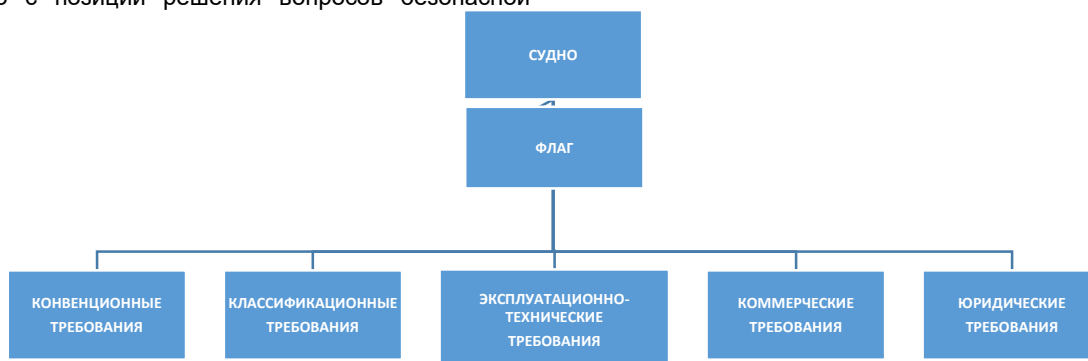


Рис. 2. Требования к морскому судну

В конвенциях технического характера понятие судно значительно расширено. Например, в Международных правилах предупреждения столкновений судов в море 1972 г. (МППСС-72) Слово судно означает все виды плавучих средств, включая не водоизмещающие суда и гидросамолеты использующиеся в качестве средств передвижения по воде. Международная конвенция МАРПОЛ-73/78 определяет судно, как эксплуатируемое в морской среде судно любого типа и включает подводные суда, плавучие средства, а также стационарные и плавучие платформы. Согласно положениям Конвенции о международной спутниковой связи 1976 г. (ИНМАРСАТ) определение судна включает эксплуатируемое в морской среде судно любого типа, в частности, непостоянно закрепленные платформы. В международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 г. (СОЛАС-1974) понятие судно четко не определено, хотя она должна применяться к судам совершающим международные рейсы и не применяется к рыболовным судам, военным кораблям и транспортам, прогулочным яхтам и деревянным судам, судам, не имеющим механических средств движения и грузовым судам валовой вместимостью менее 500 регистровых тонн.

Учитывая вышеизложенное, несложно сделать вывод, что беспилотник подпадает под понятие судна для целей соответствующих конвенций и следовательно, должен быть приведен в состояние соответствующее конвенционным требованиям.

В то же время, говоря о судне, его следует с одной стороны рассматривать как сложное инженерно-техническое сооружение являющееся объектом повышенной опасности с постоянным несением вахт, а с другой стороны как инструмент для получения прибыли. Субъект правоотношений от работы на рынке и объект гражданских правоотношений, т. е. недвижимое имущество как предмет договора. Поэтому, понятие судна следует соотносить с национальным законодательством. В п.1 ст.7 КТМ РФ например, под судном понимается самоходное или несамоходное плавучее сооружение, используемое в целях торгового мореплавания [20]. В этом смысле судно должно быть зарегистрировано Администрацией (государством флага) т.е. получить национальность подтвержденную свидетельством «о праве плавания под флагом».

Женевская конвенция об открытом море 1958г. и конвенция по морскому праву 1982г. определяют, что должна существовать реальная связь между судном и государством флага осуществляющим свою юрисдикцию и контроль над судами. Недавно, международная морская организация ИМО заявила о намерении принять срочные меры в связи с усилением угрозы регистрации судов мошенническим путем. В рамках дискуссии был также затронут вопрос регистрации автономных судов, который является пока нерешенной проблемой юридического характера [21]. При регистрации судна под флагом Администрация должна выдать на судно еще два документа, а именно «свидетельство о минимальном составе экипажа» и «лицензию на судовую радиостанцию». Здесь Администрация уже будет руководствоваться требованиями Международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 г. (СОЛАС-74). Конвенция позволяет Администрации освободить

любое судно (например, беспилотное) имеющее особенности нового типа, от выполнения любых положений глав II-1,II-2,III,IV [22]. С учетом предоставленных изъятий лицензия на судовую радиостанцию может содержать только оборудование необходимое для удаленной навигации беспилотного судна любого типа. Сложнее для беспилотного судна дело обстоит с экипажем, требования к которому определены в главе V конвенции «безопасность мореплавания». Но, здесь тоже предусмотрена возможность Администрации для отдельных судов предоставить изъятия или эквивалентные замены (например, замены на береговых операторов вместо экипажа на борту, или на оборудование, полностью замещающее экипаж и способное самостоятельно принимать решения).

Следующие блоки, согласно, схемы (см. рис. 2) это конвенционные и классификационные требования. Учитывая, что на сегодня нет правил ни у одного Классификационного общества, получить беспилотному судну «классификационное свидетельство» скорее всего не представляется возможным. Но, это не является препятствием для выполнения международных рейсов. В мире эксплуатируется много морских судов, не имеющих класса, а имеющих исключительно пакет обязательных конвенционных документов. Получить конвенционные документы от имени Администрации в принципе не должно представлять сложностей, если построить беспилотник удовлетворяющий по конструкции, оборудованию и снабжению требованиям для стандартных конвенционных судов, с учетом изъятий предоставленных Администрацией по конвенции СОЛАС-74[14]. Изъятия можно получить и по Международной конвенции о грузовой марке 1966 г. (КГМ-66/88), как для судна с новыми конструктивными особенностями (например, уменьшить надводный борт и т. п.). Экологически «чистые» беспилотники использующие аккумуляторные батареи или природный газ в качестве топлива не подпадут под действие Международной конвенции о гражданской ответственности за ущерб от загрязнения бункерным топливом 2001г. Вопросы возникают только в связи с Международной конвенцией о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978г. (ПДНВ-78/95). Конвенция применяется к морякам, работающим на морских судах, имеющих право плавания под флагом. При этом в конвенции не определено само понятие «моряк». Как нам представляется (учитывая применение конвенции только к «работающим на морских судах») следует обратиться к определению понятия «моряк» (любое лицо, занятое на любой должности или работающее по найму в любом качестве на борту судна) в Международной конвенции 2006 года о труде в морском судоходстве (МЛС-2006). Аналогичное определение дано в Международной конвенции МОТ №185 2003г., которая пересматривает конвенцию 1958 г. об удостоверениях личности моряков. Отсюда следует однозначный вывод, что береговой персонал занимающийся управлением беспилотного морского судна не относится к морякам и на него не распространяется конвенция ПДНВ-78/95 и МЛС-2006. Для снятия всех возможных противоречий со Стороной государства порта, при технической эксплуатации беспилотного морского судна любого

типа, судовладельцу, или назначенной им ответственной компании, удовлетворяя требованиям глав IX и XI-2 конвенции СОЛАС-74 [14], необходимо подробно отразить свой менеджмент применительно к беспилотным судам в рамках Международного кодекса по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращению загрязнений (МКУБ) и Международного кодекса по охране судов и портовых средств (ОСПС) с указанием обязанностей и квалификации лиц занимающихся удаленной эксплуатацией судна, и назначенных лиц компании отвечающих за выполнения требований соответствующих кодексов и конвенций.

Собственно, для работы на рынке морских перевозок остается удовлетворить оставшимся блокам (см. схему, Рис. 2.). Но здесь уже возникают непреодолимые на сегодняшний день сложности. Прежде всего, встает вопрос, есть ли у судна капитан или лицо командующее судном? Очевидно, нет и если придерживаться изложенных выше рассуждений, так как у судна нет экипажа на борту, а должность капитана предусматривает компетенции по управлению судном, исключительно находясь на борту, в рамках конвенции ПДМНВ-78/95. Поэтому, в своей системе менеджмента судовладелец или назначенная им компания должны обязательно предусмотреть лицо из берегового персонала, командующее судном, его квалификацию, ответственность и полномочия. Но, данный менеджмент не может препятствовать страховой компании при любой аварии и по любому риску отказать в выплатах, на том основании, что судовладелец совершил «грубую неосторожность» путем ошибки его служащих отдающих команды на судно с берега. Или, например, страховая компания может признать, что судно заведомо находилось в немореходном состоянии (а подтвердить мореходность беспилотного судна без его классификации практически невозможно). При таком подходе, становится бессмысленным страховать судно по «КАСКО» и «P&I» рискам.

Остаются неясными процедуры доступа на судно и в закрытые помещения, процедуры аварийной буксировки и борьбы за живучесть. Возникают вопросы по работе с лоцманом, учитывая то обстоятельство, что ни у одного лоцмана в мире на сегодня нет компетенции по осуществлению проводки беспилотного судна. Нет соответствующих компетенций у пограничных и таможенных властей, агентов, стивидоров, крановщиков и докеров в портах. Нет компетенций по работе с беспилотным судном у капитанов портовых буксиров и швартовных команд. Нет компетенций у грузовых сюрвейеров определяющих количество груза и правильность укладки. Нет компетенций у бункеровщиков и сервисных радиоспециалистов, судоремонтников и даже у инспекторов регистра, и портового контроля (так как для беспилотного судна не существует утвержденных правил постройки, эксплуатации и процедур контроля со стороны государства порта в рамках региональных меморандумов). Поэтому, остается открытым самый серьезный вопрос по процедурам контроля со стороны государства порта, в частности необходимых и достаточных доказательств нахождения беспилотного судна в мореходном состоянии, а также заявленного уровня охраны (неясно, кто должен охранять судно при

стоянке у причала и на рейде. Должен ли беспилотное судно охранять порт или специально лицензированная охранная компания?). Неясными остаются вопросы, кто должен подписывать коносаменты и кто может вносить в них оговорки? Насколько оговорки в коносаментах будут законными, если на судне отсутствует капитан и экипаж? В каком качестве в данном случае должен выступать судовой агент и согласиться ли он выпускать коносаменты для беспилотного судна?

Следует также учитывать и то обстоятельство, что на сегодня просто нет разработанных про-форм чартеров и коносаментов для перевозок на беспилотном судне. Применить стандартные про-формы проблематично, так как, не определено кто в отсутствие экипажа и капитана осуществляет должную заботливость о грузе и судне, каким образом распределяются риски между судном грузом и фрахтом, судовладельцем и фрахтователем (например, для стандартного судна нет практики «тайм-чартера» без экипажа, фрахтование судна без экипажа относится уже к другому типу чартера и распределение обязанностей и рисков идет по «бербоут-чартеру»).

### Заключение

1. Внедрение беспилотных судов в рынок международных морских перевозок, по нашему мнению, будет идти достаточно постепенно, по мере списания на лом и вывода из эксплуатации стандартных конвенционных судов с экипажем построенных в последние 10–15 лет. Учитывая то обстоятельство, что пока не окупятся соответствующие вложения в отрасль (это порядка 20–25 лет) нельзя ожидать финансирования банками и инвесторами строительства судов новых типов. Вначале, скорее, будет происходить внедрение полуавтономных «умных судов» с сокращенным экипажем на базе модернизации проектов судов стандартных конвенционных типов. The Journal of Commerce также отмечает, что в ближайшем будущем частично автономные суда с меньшим числом членов экипажа будут поступать в эксплуатацию с большей вероятностью, чем полностью автономные суда [4]. Хотя, удовлетворить конвенционным требованиям, как мы видели, для беспилотных судов возможно и на сегодняшний день, но классификационным требованиям только по мере развития правил классификационных обществ, и удешевления постройки (за счет появления стандартного оборудования). Выходом из сложившейся ситуации может стать разработка для соответствующих типов автономных судов классов ИМО, а также внедрения в практику судоходства самостоятельного кодекса или кон-венции охватывающих все вопросы технического и юридического характера для практической эксплуатации беспилотных судов.

2. Скорее, вначале следует ожидать внедрения беспилотных судов удаленно управляемых с берега, по мере развития конвенционных требований к ним. Появление же судов с «искусственным интеллектом», дело далекого будущего для международных морских перевозок, и вряд ли будет легко внедряться из за огромных рисков такой навигации для прибрежных государств и государства



порта, а также с позиций сложности контроля мореходного состояния и уровня охраны судна.

3. Первыми на рынок придут беспилотные грузовые суда внутреннего плавания и портовые средства, что происходит в экспериментальных целях уже в настоящее время. По мере развития технологий, технических стандартов и процедур для беспилотных судов и создания унифицированного оборудования, следует ожидать их поэтапного внедрения в международных морских перевозках. Вначале это будут только линейные суда (например балкеры, контейнеровозы и танкеры) обслуживающие крупных перевозчиков, которые являются одновременно владельцами портовых терминалов и грузовладельцами. Далее, после апробации линейных судов, на рынок могут выйти уже универсальные трамповые беспилотники.

4. Для массового внедрения в рынок морских международных перевозок необходимым условием является создание международного законодательства учитывающего новые конвенционные требования для коммерческого использования беспилотных судов. Также, необходимо, прежде всего, принять конвенционные требования по подготовке и дипломированию

береговых операторов удаленно управляющих судном. Предпочтительной формой, по нашему мнению, будет создание в береговом подразделении судоходной компании «удаленного экипажа» с конвенционными требованиями к соответствующим компетенциям по необходимым должностям. При этом, предпочтительнее будет создать должность «капитан удаленного доступа», что снимет целый ряд противоречий юридического характера для целей коммерческой эксплуатации судна. Следует учитывать и то обстоятельство, что работа с беспилотными судами потребует разработки соответствующих стандартов компетенций применительно ко всем участникам логистического процесса грузоперевозки, в том числе для соответствующей власти государства порта и Администрации флага, что приведет очевидно к созданию новых должностей и конвенционных требований по компетенциям к ним. Потребуется также разработка и пересмотр всех имеющихся на сегодняшний день проформ чартеров и коносаментов, а также развития понятий общей аварии и морского протеста для практики эксплуатации беспилотных судов

#### Литература

1. Hong Kong Shipping Gazette, September 26, 2017.
2. Беспилотные суда: Плавающие дроны. URL:<http://tagweb.ru> (дата обращения 07.08.2018).
3. Неумелое управление «умными» судами может повлиять на безопасность // Журнал Морской профсоюзный вестник: ежедн. интернет-изд. 05.06.2018 URL:<http://www.sur.ru/news> (дата обращения 09.06.2018).
4. The Port Technology International, December 02, 2015.
5. Морские беспилотные корабли-роботы // LIVEJOURNAL: интернет-изд. 2017. URL: <http://edotokuo.livejournal.com> (дата обращения: 31.03.2017).
6. В России разрабатывают роботизированный тримаран «Тень» для дальней морской зоны// news.rambler.ru: ежедн. интернет-изд. 2017. 20 авг. URL: <http://news.rambler.ru/weapon/37742033-v-roscii> (дата обращения: 20.08.2017).
7. Maritime Journal, Febr. 27,2018 (UK).
8. INTERPARUS. URL: <http://interparus.com> (дата обращения: 07.08.2018).
9. gCaptain, Apr.4,2018(Austral).
10. Hong Kong Shipping Gazette, May 24, 2017.
11. Zelle LLP, October 6, 2016(Suom).
12. Drewry, Sept.5, 2017.
13. gCaptain, June13, 2017 (Austral).
14. Hong Kong Shipping Gazette, August 19, 2017.
15. «Росатом» создает цифровую модель без экипажного судна для Арктики // Журнал Морской профсоюзный вестник: ежедн. Интернет-изд. 28.04.2018. URL: <http://www.sur.ru/news> (дата обращения 09.08.2018).
16. Беспилотные корабли будущего // Военно-морские силы : ежедн. интернет-изд. 3 февраль 2017. <http://technowars.defence.ru> (дата обращения 31.03.2017).
17. Инф. бюллетень ДВАМК, № 19, июнь 2017 г.
18. Комитет по безопасности на море IMO одобрил основу для аналитического исследования об использовании автономных судов // отраслевой портал Российское судоходство – 30.05.2018. URL: <http://www.rus-shipping.ru> (дата обращения 07.08.2018).
19. Судовладельцы скептически относятся к беспилотным судам // Журнал Морской профсоюзный вестник: ежедн. Интернет-изд. 21.09.2017. URL: <http://www.sur.ru/news> (дата обращения 21.09.2017).
20. Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации – СПб. : ЗАО «ЦНИИМФ», 2015. – 232 с.
21. Потребуется ли менять правила регистрации для автономных судов? // Журнал Морской профсоюзный вестник : ежедн. Интернет-изд. 21.09.2017. URL: <http://www.sur.ru/news/5726> (дата обращения 21.09.2017).
22. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года (текст, измененный Протоколом 1988 года к ней, с поправками) – СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2008. – 984 с.

#### References

1. Hong Kong Shipping Gazette, September 26, 2017.
2. Bepilotnyie suda: Plavaushie dronyi. URL:<http://tagweb.ru> (data obrasheniia 07.08.2018).
3. Neumeloe upravlenie «umnyimi» sudami mozhet povliiat na bezopasnost // Zhurnal Morskoi profsouznyii vestnik: ezhedn. internet-izd. 05.06.2018 URL:<http://www.sur.ru/news> (data obrasheniia 09.06.2018).
4. The Port Technology International, December 02, 2015.

5. Morskije bespilotnyie korabli-robotyi // LIVEJOURNAL: internet-izd. 2017. URL: <http://edo-tokyo.livejournal.com> (data obrasheniia: 31.03.2017).
6. V Rossii razrabatyivaut robotizirovannyi trimaran «Ten» dlia dalnei morskoi zony// news.rambler.ru: ezhedn. internet-izd. 2017. 20 avg. URL: <http://news.rambler.ru/weapon/37742033-v-roscii> (data obrasheniia 20.08.2017).
7. Maritime Journal, Febr. 27,2018 (UK).
8. INTERPARUS. URL: <http://interparus.com> (дата обращения: 07.08.2018).
9. gCatain, Apr.4,2018(Austral).
10. Hong Kong Shipping Gazette, May 24, 2017.
11. Zelle LLP, October 6, 2016(Suom).
12. Drewry, Sept.5, 2017.
13. gCaptain, June13, 2017 (Austral).
14. Hong Kong Shipping Gazette, August 19, 2017.
15. «Rosatom» sozdaet tcifrovuu model bez эkipazhnogo sudna dlia Arktiki // Zhurnal Morskoi profsouznyii vestnik : ezhedn. Internet-izd. 28.04.2018. URL: <http://www.sur.ru.news> (data obracheniiia 09.08.2018).
16. Bespilotnyie korabli budущего // Voенно-morskije silyi : ezhedn. internet-izd. 3 fevral 2017. <http://technowars.defence.ru> (data obracheniiia 31.03.2017).
17. Inf. biolleten DVAMK, № 19, iun 2017 г.
18. Komitet po bezopasnosti na more IMO odobril osnovu dlia analiticheskogo issledovaniia ob ispolzovanii avtonomnyikh sudov // otraslevoi portal Rossiiskoe sudokhodstvo – 30.05.2018. URL: <http://www.rus-shipping.ru> (data obracheniiia 07.08.2018).
19. Sudovladel'tcyi skepticheski otnosiatsia k bespilotnyim sudam // Zhurnal Morskoi profsouznyii vestnik k: ezhedn. ezhedn. Internet-izd. 21.09.2017. URL: <http://www.sur.ru/news> (data obracheniiia 21.09.2017).
20. Kodeks torgovogo moreplavaniia Rossiiskoia Federacii – SPb. : ZAO «CNIIMF», 2015. – 232 с.
21. Potrebuetsia li meniat pravila registracii dlia avtonomnyikh sudov? // Zhurnal Morskoi profsouznyii vestnik : ezhedn. Internet-izd. 21.09.2017. URL: <http://www.sur.ru/news/5726> (data obracheniiia 21.09.2017).
22. Mezhdunarodnaia konvenciiia po okhrane chelovecheskoi zhizni na more 1974 goda (tekst, izmenennyi Protokolom 1988 goda k nei, s popravkami) – SPb.: ZAO «CNIIMF», 2008. – 984 с.

ДК 629.5.017

## МЕТОДОЛОГИЯ ПРОГНОСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ФОРМАЛИЗОВАННОЙ ОЦЕНКЕ УРОВНЯ КОНСТРУКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МОРСКИХ СУДОВ

**Михаил Анатольевич Москаленко**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Теории и устройства судна  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел. +7(902) 4812121, e-mail: asmsh@rambler.ru

**Иван Борисович Друзь**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Теоретической механики и сопротивления материалов  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а  
e-mail: druz\_i\_b@mail.ru

**Владислав Михайлович Москаленко**

курсант  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел. +7-902-481-21-21 e-mail: asmsh@rambler.ru

### Аннотация

Международный кодекс по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращением загрязнения (МКУБ) требует, чтобы компании отвечающие за эксплуатацию определили своей целью «оценку всех выявленных рисков для своих судов, персонала и окружающей среды и создали соответствующую защиту». Поэтому, внедрение в практику судоходства системы формализованной оценки безопасности является одним из требований Международной морской организации (ИМО). Тем не менее, оценить уровень конструктивной безопасности в эксплуатации представляется достаточно сложной задачей, так как ее формализованную оценку можно провести только при доковании судна. Развитие в международных морских перевозках логистических схем экономии издержек на «эффекте масштаба перевозки» привели к неоправданному резкому росту размеров судов. Простая размерная модернизация проектов судов конвенционных типов, с оптимизацией коэффициента утилизации водоизмещения по дедейте, несет в себе скрытые угрозы опасных состояний для корпуса с «оптимальным моментом сопротивления поперечного сечения». Недооценка рисков эксплуатации, при таких подходах к проектированию, выявила скрытые проблемы в обеспечении конструктивной безопасности и как следствие серьезные аварии последних лет связанные с переломами корпусов относительно новых судов.

**Ключевые слова:** конструктивная безопасность, риск, момент сопротивления, старение

## METHODOLOGY OF THE PREDICTIVE APPROACH FORMALIZED ASSESSMENT OF THE STRUCTURAL SAFETY LEVEL OF SHIPS

**Mikhail A. Moskalenko**

Dr.Sci.Tech., professor  
Professor of Ship theory and structure department  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel. +7(902) 4812121, e-mail: asmsh@rambler.ru

**Ivan B. Druz**

Dr. Sci. Tech., professor  
Professor of department of Theoretical mechanics and strength of materials  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
e-mail: druz\_i\_b@mail.ru

**Vladislav M. Moskalenko**

cadet  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel. +7-902-481-21-21 e-mail: asmsh@rambler.ru

### Abstract

The international management code for the safe operation of ships and for pollution prevention (ISM code) requires that the company responsible for the operation identified as its objective «assessment of all identified risks to its ships, personnel and the environment and established the appropriate

protection». Therefore, the implementation of the navigation system formal safety assessment is a requirement of the International Maritime organization (IMO). However, to assess the level of structural safety in operation is quite a difficult task, as her formal assessment could be carried out only when the ship's docking. The development in the international Maritime transport logistics cost savings «economies of scale in transportation» led to an unjustified sharp increase in ship sizes. Simple dimensional modernization projects of ships of conventional types, with the optimization of the ratio of recycling tonnage by deadweight, carries the hidden threat of the dangerous States for the body with «the optimum resistance moment of the cross section» underestimation of the risks of exploitation in these design approaches has revealed hidden problems in ensuring structural safety and as a result of a serious accident of recent years are associated with fractures of the buildings are relatively new vessels.

**Key words:** structural safety, risk, moment of resistance, aging

### Введение

Согласно циркуляру ИМО MSC/Circ/ 102 формализованная оценка риска – это структурированная и систематизированная методология, направленная на улучшение безопасности на море, включая защиту жизни, здоровья, окружающей среды и собственности, путем оценки риска и соответствующих затрат и преимуществ. Это требование вступило в силу с первого июля 2010 года. ИМО предписывает, чтобы оно нашло отражение в системах управления безопасностью (СУБ), а администрации флагов контролировали его выполнение. ИМО определяет риск как комбинацию частоты и серьезности последствий (в своём циркуляре MSC/Circ 1023/MEPC/Circ 392). При этом, нетрудно видеть, что исходя из определения риска, самой серьезной опасности (например перелому судна) может соответствовать минимальный уровень риска.

#### 1. Система оценки безопасности судна

Конструктивная безопасность относится к так называемой пассивной (или строевой) составляющей в формализованной системе оценки безопасности морского судна, т. е. её фактически невозможно определить в эксплуатации.

Строительство морского транспортного флота в последние годы характеризуется резким увеличением размеров судов. В отсутствие возможностей увеличения фрахта со стороны грузоотправителей, учитывая жесткую конкуренцию на судоходном рынке, в логистических схемах международных морских перевозок повсеместно стали применяться принципы «экологии масштаба» на единицу перевозимого груза (т. е. уменьшая издержки перевозок путем увеличения размеров судов). Рассматривая судно КА «инструмент для получения прибыли» стали применяться оптимизационные схемы полной утилизации материала корпуса судна, где поперечное сечение должно работать в режиме полной утилизации материала продольных связей.

Корпуса судов изобилуют прерывистыми связями и из ценными соединениями в узлах соединения перекрытий, что делает корпус судов максимально чувствительными к отказу по типу «слабого звена». В этом отношении вызывают удивление уже суда длиной 288 м, как например м/т «Prelude Fling», контейнеровоз «MOL Triumph» длиной 400 м, навалочники типа «Malacstaх» длиной 470 м и т. п.

Недооценки рисков эксплуатации и масштабный эффект, с ростом неравномерности между силами веса и поддержания, несут в конструкции таких судов

скрытые угрозы внезапного исчерпания несущей способности корпуса, даже при нагрузках значительно ниже предельных. С ростом ширины супер судов начинают стираться грани между понятиями общей и местной прочности, нуждаются в пересмотре понятия опорного контура и т. п. Как результат, серьезные аварии связанные с переломом судов (например т/х MSC Napoli, т/х Comfort, т/х Rena и др.)

Но морское судно находится в условиях интенсивной коррозии (особенно при работе в разных широтах) и/или механического износа (для судов плавающих во льдах) разумеется, это приводит к уменьшению уровня конструктивной безопасности и увеличению риска её потери по «схеме слабого звена». Контроль «конструктивной безопасности» со стороны государства порта, согласно резолюции ИМО А.787(19), носит достаточно поверхностный формальный характер. Оценка, же реального технического состояния судна может быть произведена только в доке, но её как правило проводят только к середине срока.

Стандарт, касающийся общей прочности судов, существовавший до 1966 г., был прописан в Международной конвенции по грузовой марке. Под стандартом общей прочности понимают требуемые моменты сопротивления расчетного поперечного сечения корпуса судна (эквивалентного бруса) на уровне палубы у борта  $W_a$ , и на уровне основной плоскости – горизонтального килля –  $W_b$ . Моменты сопротивления эквивалентного бруса характеризуют способность судового корпуса сопротивляться внешним силам. По изменениям величины момента сопротивления эквивалентного бруса можно судить об уровне конструктивной безопасности судна. Решение задачи прогнозирования технического состояния корпуса судна требует организации специальной системы сбора, обработки и формирования базы данных об опыте эксплуатации корпусов морских судов [1].

Такая система нами была построена на основании имеющейся информации об изменениях моментов сопротивлений эквивалентного бруса серийных судов семи типов в дискретные моменты времени за 30 лет их жизненного цикла. Указанная статистика была собрана по 63 сухогрузным судам.

Вся совокупность имеющихся данных по всем анализируемым судам представляла собой ряды малочисленных (до 10) наблюдений коллективного типа, не принадлежащих одной генеральной совокупности.

Задача исследования имеющейся информации состояла в установлении скрытых в ней закономерностей и определения операторов

преобразования, обеспечивающих объединение рядов малочисленных выборок в одну расширенную, принадлежащую одной генеральной совокупности.

Решение этих задач сводилось к специальной обработке имеющихся данных по всем судам.

Особенность обработки измерительной информации заключалась в установлении закономерностей и доказательстве предположения о принадлежности имеющейся выборки исследуемого параметра по всем судам одной генеральной совокупности.

Для решения этих задач исследуемый параметр – момент сопротивления эквивалентного бруса  $W_{ij}$  представлялся в виде произведения стационарной  $W_{0j}$  и случайной  $X_{ij}$  составляющих

$$W_{ij} = W_{0j} * X_{ij} \quad (1)$$

**2. Использование мультипликативной модели для обработки информации**

В формализованном виде мультипликативную модель (1) можно определить, как выполнение между составляющими операндами  $W_{0j}$  и  $X_{ij}$  операции композиции  $W_{0j} * X_{ij}$ . Результаты вычисления этой бинарной операции умножения обычно оформляют в виде таблицы Кэли (табл. 1).

Таблица 1

**Таблица результатов бинарной операции умножения операторов  $W_{0j}$  и  $X_{ij}$**

*	$X_1$	$X_2$	$X_{31}$	*	$X_m$
$W_{01}$	$W_{11}$	$W_{21}$	$W_{31}$	*	$W_{m1}$
$W_{02}$	$W_{12}$	$W_{22}$	$W_{32}$	*	$W_{m2}$
$W_{03}$	$W_{13}$	$W_{23}$	$W_{33}$	*	$W_{m3}$
*	*	*	*	*	*
$W_{0n}$	$W_{1n}$	$W_{2n}$	$W_{3n}$	*	$W_{mn}$

В данном случае в ней (для каждого  $j$ -го судна) записаны расчетные значения моментов сопротивления эквивалентного бруса, определявшиеся в  $i$ -е (дискретные) периоды времени.

На основании статистического анализа результатов, представленных в табл. 1, было установлено.

1. Значения  $W_{ij}$  зависят от главных размерений судна и времени его эксплуатации.

2. Для каждого судна значения  $W_{ij}$  являются случайными характеристиками его технического состояния.

3. Вся имеющаяся выборка значений  $W_{ij}$  (см. табл. 1) не принадлежит одной генеральной совокупности.

4. Декомпозиция модели (1) на стационарную  $W_{0j}$  и случайную  $X_{ij}$  составляющие по схеме

$$X_{ij} = 1 - \sum W_{ij} / W_{0j} \quad (2)$$

позволяет сформировать матрицу  $C$  старения корпуса судна, элементы которой не зависят от его размеров

$$C = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{21} & X_{31} & \dots & X_{m1} \\ X_{12} & X_{22} & X_{32} & \dots & X_{m2} \\ X_{13} & X_{23} & X_{33} & \dots & X_{m3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{1n} & X_{2n} & X_{3n} & \dots & X_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

5. Для каждого  $i$ -го периода времени диагностирования технического состояния корпуса судна элементы столбцов матрицы  $C$  для всей изучаемой выборки судов представляют собой (предположительно) нормально распределенные случайные величины, принадлежащие одной генеральной совокупности.

Проверка нулевой гипотезы о принадлежности изучаемой выборки, представленной в матрице старения (3) одной генеральной совокупности, осуществлялась по  $\chi^2$  – критерию Пирсона.

Все вычислительные процедуры выполнялись по следующему алгоритму.

1. Для каждого из изучаемых дискретных периодов времени строится графическая модель соотношения (2).

В графической модели (Рис. 1), внутри окружности единичного радиуса (ограничивающей область возможных значений  $X_{ij} < 1,0$ ) для каждого  $j$ -го судна от центра в радиальном направлении откладываются точечные значения оценок элементов столбцов матрицы старения (3).

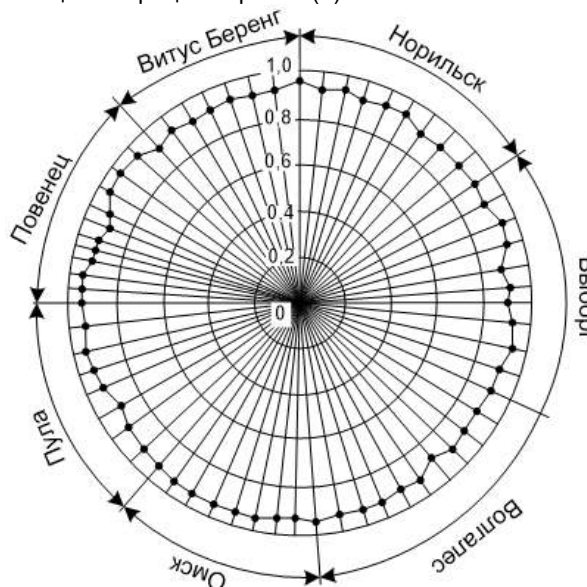


Рис. 1. Графическая модель формирования базы данных по всем судам изучаемой выборки

2. Сформированная указанным способом база данных обрабатывается стандартными статистическими методами. Результаты расчетов для всех изучаемых периодов диагностики представляются в табличной форме (см. табл. 2).

3. Для визуальной оценки совпадения эмпирического и теоретического распределений непрерывной случайной величины  $X_{ij}$  строятся гистограмма (Рис. 2) и графики функций нормального и эмпирического распределений (Рис. 3).

4. Дополнительно к визуальной выполняется так же количественная оценка различий по критерию  $\chi^2$ .

5. Проверяется выполнение критерия согласия  $\chi^2$  – квадрат (Пирсона) и формулируется вывод о выполнении нулевой гипотезы.

По этой вычислительной схеме авторами выполнялась количественная оценка технического состояния корпусов 63 судов, построенных за период с 1965 года [2, 3].

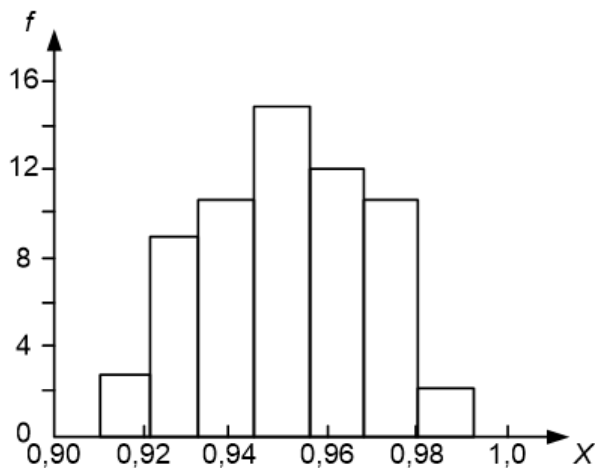


Рис. 2. Гистограмма

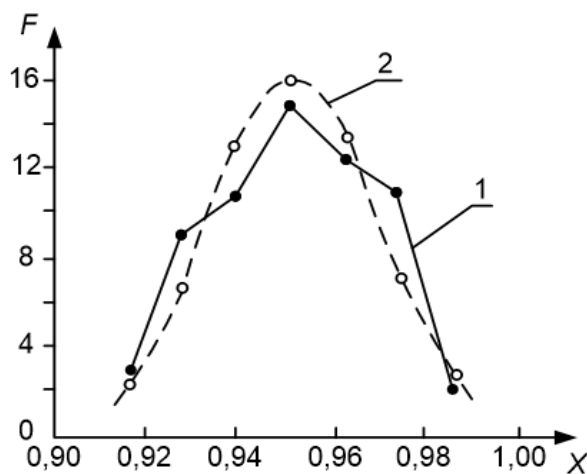


Рис. 3. Эмпирическое (1) и теоретическое (2) распределение относительного момента сопротивления эквивалентного бруса эталонного судна

### 3. Использование моделей обработки статистических данных

В качестве примера ниже представлены результаты расчетов для исследуемых судов, находящихся в эксплуатации 5–7 лет (см. Таблицу 2). Оценка показала, что распределение всех наблюдаемых значений контролируемого фактора с 5 % уровнем значимости не отличается от нормального.

Отсюда, так как  $\chi^2_{0,05} = 9,49 > \chi^2 = 2,36$ , можно сделать вывод, что наблюдаемые выборки значений элементов столбца матрицы старения (3) принадлежат одной генеральной совокупности.

$$\bar{X} = \frac{\sum fx}{\sum f} = 0,9496; S = \sqrt{\frac{f(X - \bar{X})^2}{\sum f - 1}} = 0,0169. \quad (4)$$

Разработанная авторами методика использовалась для оценки статистических характеристик старения корпусов и для других возрастных групп жизненного цикла исследуемых судов. Результаты оценки представлены в Таблице 3.

Обработка этого материала позволила установить закономерность изменения риска обеспечения конструктивной безопасности судов  $\chi R(t)$  в зависимости от их возраста. Эта закономерность старения корпуса описывается логистической симметричной функцией

$$\sigma R(t) = R_k / (1 + 10^{2t}). \quad (5)$$

Результаты оценки искомой функции модели (5) представлены ниже в Таблице 4 для  $R_k = 0,500$ ,  $R = 0,002$  и  $t = 30$  лет.

Для других значений исходных данных, необходимо в формулу (6) вводить соответствующие корректировки.

Таким образом, обобщая табличные данные, можно сделать вывод, что искомая функция  $Z(t)$  может быть представлена в следующем виде

$$Z(t) = 2,480 - 0,168t, \quad (2)$$

где  $t$  – возраст судна, годы.

Таблица 2

Расчет статистических характеристик элементов столбца матрицы старения корпусов судов, находящихся в эксплуатации 5–7 лет, и значения  $\chi^2$  для этой выборки судов

№ класса	Интервалы	Середины интервалов, X	Частоты, f	$X - \sigma X$	$U = \frac{X - \bar{X}}{S}$	$\sigma(U)$	F	$(f - F)^2$	$\frac{(f - F)^2}{F}$
1	0,9102–0,9212	0,9157	3	0,0339	2,01	0,0529	2,20	0,640	0,29
2	0,9213–0,9323	0,9268	9	0,0228	1,35	0,1604	6,60	5,760	0,87
3	0,9324–0,9545	0,9379	11	0,0117	0,69	0,3144	12,90	3,610	0,28
4	0,9435	0,9490	15	0,0006	0,04	0,3986	16,30	1,690	0,10
5	0,9546	0,9601	12	0,0105	0,62	0,3292	13,50	2,250	0,17
6	0,9657–0,9767	0,9720	11	0,0224	1,32	0,1669	6,80	4,84	0,55
7	0,9768	0,9823	2	0,0327	1,93	0,0620	2,50	0,250	0,10
$\sigma$			63						$\chi^2 = 2,36$



Таблица 3

**Результаты оценки статистических характеристик старения корпусов судов**

№ п/п	Характеристики	Возраст судов				
		8-12	13-15	18-20	22-25	26-30
1	$\sigma X$	0,7323	0,5550	0,4582	0,4210	0,3678
2	S	0,0262	0,0178	0,0262	0,0152	0,0219
3	$\chi^2$	2,29	4,07	3,67	4,68	3,15

Таблица 4

**Обработка статистических данных**

$X = t/\tau$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R	0,002	0,005	0,030	0,100	0,225	0,350	0,425	0,440	0,460	0,480
$R_k/R$	250	100	16,667	5,000	2,222	1,429	1,176	1,136	1,087	1,042
$(R_k/R)-1$	249	99,000	15,667	4,000	1,222	0,429	0,176	0,136	0,087	0,042
$Z = \lg(R_k/R-1)$	2,396	1,996	1,196	0,602	0,346	-0,567	-0,754	-0,866	-1,060	-1,377
$P_1 = 2X - 9$	-9	-7	-5	-3	-1	+1	+3	+5	+7	+9
$ZP_1$	-21,564	-13,972	-5,980	1,806	0,346	-0,567	-2,262	-4,330	-7,420	-12,393
$\sigma P_1$	2,268	1,764	1,260	0,756	0,252	-0,252	-0,756	-1,260	-1,764	-2,268
$Z(t)$	2,480	1,976	1,472	0,968	0,464	-0,040	-0,544	-1,048	-1,512	-2,016

Естественно предположить, что типовая модель жизненного цикла любого судна должна содержать циклически повторяющиеся этапы [4]: эксплуатации и ремонта, что показано на графике (Рис. 4).

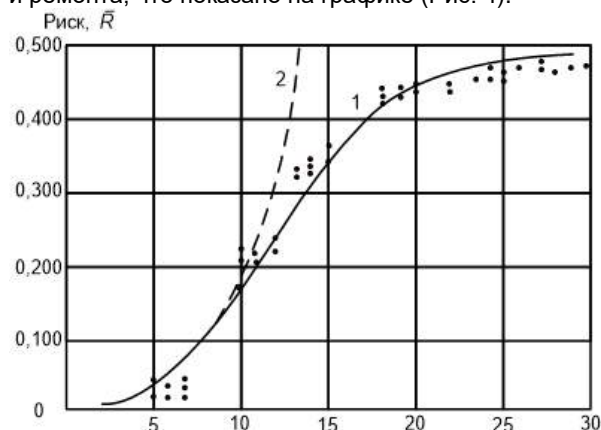


Рис. 4. Аппроксимация данных: 1 – логистической функцией с  $R_k = 0,5$  и  $Z(t) = 2,48 + 0,168t$ ; 2 – экспоненциальной функцией

Такая модель может быть базовой для прогнозирования остаточного уровня конструктивной безопасности морского судна и выработки стратегии технического обслуживания и ремонта (например, продления срока службы без ремонта путем

введения ограничений по дедвейту, району плавания и т. п.).

Также, можно определить «эквивалентный возраст судна» по результатам оценки технического состояния корпуса  $R_k$ .

**Заключение**

Рассматривая уровни риска потери конструктивной безопасности для современных судов спроектированных по критерию «предельной прочности» следует вспомнить замечания П.Ф. Папковича о том, что переход конструкции в предельное состояние «не сопровождается изменением её поперечного сечения» но, при определенных неблагоприятных условиях или ошибках эксплуатации может легко произойти потеря устойчивости крайних поясков эквивалентного бруса или заваливание стенки, что приведет к катастрофическим последствиям при нагрузках значительно меньшим предельных. По нашему мнению предельный возраст эксплуатации современных судов следует законодательно ограничивать 20–25 годами (Рис. 1).

Также, желательно ввести в СУБы систему управления уровнем конструктивной безопасности с оценкой технического состояния судна в доке со 2-го очередного освидетельствования, т.е. с середины срока службы судна.

**Литература**

1. Морские вести России. 2003 № 3 – 4. С. 16.
2. Москаленко М. А. Основы обеспечения конструктивной безопасности морских судов. – Владивосток : Дальнаука, 2005. 162 с.
3. Оценка технического состояния корпусов морских судов / А. И. Максимаджи, А. М. Беленький, А. С. Брикер, А. Ю. Неуюдов. – Л. : Судостроение, 1982.156 с.
4. Кислова И. И. Исследование и разработка методов и алгоритмов прогнозирования состояния в условиях ограниченности исходных данных: дис, ... канд. техн. наук. – Владивосток. 1994. 134 с.

**References**

1. Morskije vesti Rossii. 2003 № 3–4. S. 16.
2. Moskalenko M. A. Osnovyi obespecheniia konstruktivnoi bezopasnosti morskikh sudov. – Vladivostok: Dalnauka, 2005. 162 s.
3. Ocenka tehnišeskogo sostoianii korpusov morskikh sudov / A. I. Maksimadji, A. M. Belenkii. A. S. Briker, A. U. Neuiudov. L. : Sudostroenie, 1982.156 s.
4. Kislova I. I. Issledovanie i razrabotka metodov i algoritmov prognozirovaniia sostoianii v usloviakh ogranichenosti iskhodnykh dannykh : dis, ... kand. tekhn. nauk. Vladivostok. 1994. 134 s.

УДК 656. 61

## АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА МОРЕ: СОСТОЯНИЕ И РЕШЕНИЯ

**Валерий Анатольевич Курбенков**

кандидат политических наук

заведующий кафедрой Морского права

Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а

е-мэйл: kurbenkov@msun.ru

**Александр Петрович Пурденко**

кандидат технических наук

доцент кафедры Тактики военно-морского флота и военной истории

Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. адм. С.О. Макарова

690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6

е-mail: pva.877com@mail.ru

### Аннотация

Риск для жизни людей может быть вызван различными обстоятельствами: ошибками, допущенными судоводителями или судовым персоналом, воздействиями неблагоприятных факторов, отказами судовых систем и др. Рассмотренные в данной работе сведения об аварийности судов за период с 2015 по 2017 годы и первый квартал 2018 года и их причины позволяют обратить внимание на возможные мероприятия организационного, правового и образовательного характера, которые направлены на снижение потерь судов, грузов, человеческих жизней и как следствие повышение безопасности мореплавания. На этом основании очень важным в подготовке специалистов для данной отрасли становится выявление способности нести ответственность за совершенные действия. Во избежание аварийности необходимо пересмотреть как теоретическую подготовку, которая должна обеспечить уверенность в своих действиях судоводителей и судового персонала, так и тренажёрную подготовку, т.е. получение практических навыков, что в совокупности позволит значительно сократить время на выработку безошибочного решения в реальных условиях плавания. Так называемый «человеческий фактор» в настоящее время играет, и в дальнейшем будет играть главную роль в управлении такими сложными процессами, как безопасность мореплавания.

**Ключевые слова:** безопасность мореплавания, сведения об аварийности судов, «человеческий фактор», несоблюдение общепринятых приёмов и способов управления судном, теоретическая и практическая подготовка

## ANALYSIS OF SECURITY PROBLEMS AT THE SEA: STATE AND SOLUTIONS

**Valery A. Kurbenkov**

Cand. Sci. Politics

Director of department of Law of the sea

Maritime State University named after admiral G. I. Nevelsoi

Verkhneportovaya, 50a. Vladivostok 690069

е-mail: kurbenkov@msun.ru

**Alexander P. Purdenko**

Cand. Tech. Sci.

Associate professor of department of Tactics of the Navy and military history

Pacific Higher Naval School named Admiral S. Makarov

6, Kamskiy pereulok, 690062, Vladivostok, Russia

е-mail: pva.877com@mail.ru

### Abstract

The risk to human life can be caused by various circumstances: mistakes made by boat masters or ship personnel, the effects of unfavorable factors, ship system failures, etc. The information on the accident rate of vessels for the period from 2015 to 2017 and the first quarter of 2018 and their reasons considered in this paper allow us to draw attention to possible organizational, legal and educational measures aimed at reducing losses of ships, cargo, human lives and as a consequence improvement of safety of navigation. On this basis, it is very important in training specialists for this industry to identify the ability to be responsible for the actions performed. In order to avoid accidents, it is necessary to reconsider both theoretical training, which should ensure the confidence of navigators and ship personnel in their actions, as well as simulator training, i.e. obtaining practical skills, which together will significantly reduce the time to develop an error-free solution in real conditions of navigation. The so-called "human factor" is currently playing, and in the future will play a major role in managing such complex processes as the safety of navigation.

**Key words:** *safety of navigation, information on ship accidents, "human factor", non-observance of generally accepted techniques and methods of ship management, theoretical and practical training*

**Введение**

Термин «безопасность» имеет множество различных толкований. В Законе о безопасности России, принятом в 1992 году, понятие безопасность толкуется как «уровень защищенности человека от внешних и внутренних ситуационных обстоятельств». Оксфордский словарь дает определение – «свобода от опасности», коммерческие документы – «отсутствие потери денег», другие источники – «свобода от недопустимого риска» [1].

Обеспечения абсолютной безопасности достичь нельзя, но можно добиться достижения приемлемого риска, при котором опасность минимальна. В соответствии с морским энциклопедическим справочником безопасность – это сохранность человеческих жизней и имущества на море, которое обеспечивается системой национальных и международно-правовых мер технического, организационного, социального и правового характера [2].

Таким образом, безопасность мореплавания - это относительно стабильное состояние, свободное от опасностей, которое обеспечивается системой международных и национальных мер технического, организационного, экономического, социального и правового характера, направленных на уменьшение и предотвращение аварийности в целях сохранности человеческих жизней и имущества на море, защиты и сохранения морской среды [3].

Есть три аспекта по управлению безопасностью: технический аспект, «человеческий фактор» и социально-технический.

Технический подразумевает поиск технических решений, направленных на повышение уровня безопасности, включая разработку правил и норм, которые регламентируют ее уровень (классификационные общества всего мира разрабатывают нормы прочности корпуса).

Второй аспект, то есть «человеческий фактор», по данным статистики, является определяющим, поскольку 75% аварий происходит из-за ошибок человека. Поэтому особое внимание должно уделяться подготовке моряков, которая начинается с процесса их образования.

Лишь на этой начальной стадии формирования специалиста возможно привить культуру безопасности.

Эффективно управление безопасностью достигается с помощью использования эргономики, которая является наукой о приспособлении рабочих мест, техники, предметов и объектов труда, должностных обязанностей в целях наиболее безопасного и эффективного труда работников с учетом физического и психического состояния организма человека, то есть соответствующее проектирование и постройка судов, урегулирование всех процессов, позволяющих улучшить взаимодействие системы человек-оператор.

Социально-технический аспект заключается в коммуникации между персоналом и техникой, во взаимодействии двух подсистем - социальной и технической.

Согласно статьи 94 Конвенции ООН по морскому праву 1982 года, каждое государство в отношении судов, плавающих под его флагом, принимает необходимые меры для обеспечения безопасности в море, в частности в том, что касается комплектования, условий труда и обучения экипажей судов с учетом применимых международных актов.

Несмотря на то, что происходит интенсивное развитие способов, методов и различных средств обеспечения безопасности мореплавания, с другой стороны выступают факторы, которые снижают уровень безопасности: внушительные размеры морских судов, рост скорости движения, а так же не прогнозируемые экстремальные погодные условия [4]. И как следствие в море ежегодно терпит кораблекрушение более 200 крупных судов. Ежегодно в мире погибает около 2 000 человек, теряется более миллиона тонн грузов, в морскую среду попадают нефтепродукты и другие загрязняющие вещества [5].

**1. Анализ статистических данных об аварийности судов**

Основное внимание в данном разделе уделим анализу и рассмотрению характерных аварийных случаев с судами на море и внутренних водных путях, плавающими под флагом Российской Федерации. Данные представлены в Таблицах 1 и 2.

В 2015 году на водном транспорте произошло аварий на 59 % больше чем за аналогичный период 2014 года (в 2015 г. - 79 аварий, в 2014 г. – 49). Всего при аварийных случаях погиб 91 человек, все – члены экипажей судов, 1 член экипажа получил тяжкое телесное повреждение.

Таблица 1

**Сведения об аварийности с судами на море и на внутренних водных путях в период с 2015 по 2017 годы**

Показатель	2015 год	2016 год	2017год
На море			
ВСЕГО АВАРИЙНЫХ СЛУЧАЕВ	72	82	84
с судами торгового мореплавания	49	47	49
с рыбопромысловыми судами	23	35	35
ОЧЕНЬ СЕРЬЕЗНЫЕ АВАРИИ	5	4	8
с судами торгового мореплавания	3	2	5
с рыбопромысловыми судами	2	2	3
АВАРИИ	67	78	76
с судами торгового мореплавания	46	45	44
с рыбопромысловыми судами	21	33	32
Погибших в прямой связи с эксплуатацией судна, человек	86	22	22

из них пассажиров	-	-	2
на судах торгового мореплавания	12	9	6
на рыбопромысловых судах	74	13	16
Получивших тяжкий вред, причинённый здоровью в прямой связи с эксплуатацией судна, человек	1	5	6
на судах торгового мореплавания	1	3	2
на рыбопромысловых судах	-	2	4
На ВВП			
Аварий	7	6	5
Количество погибших	5	2	2
Количество травмированных	-	3	-
Всего на водном транспорте			
Аварий	79	88	89
Количество погибших	91	24	24
Количество травмированных	1	8	6

Причины, повлекшие аварийные случаи:

- 1) недостатки в организации ходовой навигационной вахты и штурманской службы на судах;
- 2) несоблюдение общепринятых приёмов и способов управления судном;
- 3) не учёт гидрометеорологических особенностей района плавания и стоянки судов;
- 4) несоблюдение Правил технической эксплуатации морских судов, Правил технической эксплуатации судовых технических средств и конструкций, Положения о технической эксплуатации судов рыбной промышленности и должностных инструкций;
- 5) нарушение правил морской буксировки;
- 6) не учёт гидрометеорологических особенностей района плавания;
- 7) несоблюдение правил техники безопасности при швартовых и рыбопромысловых операциях;
- 8) несоблюдение правил техники безопасности при высадке (снятии) морских лоцманов на судно (с судна);

- 1) несоблюдение правил техники безопасности при швартовой операции.

В 2016 году на водном транспорте произошло аварий на 11,4 % больше, чем в 2015 году (в 2016 г. - 88 аварий, в 2015 г. – 79).

Таблица 2

**Показатели аварийности на море по видам в период с 2015 по 2017 годы**

Виды АС	2015 год	2016 год	2017 год
Навигационные, всего из них:	26	32	23
посадка на мель	15	17	10
навал	4	8	4
столкновение	1	3	6
потеря остойчивости, плавучести	5	2	-
касание приотпленного предмета	-	1	3

повреждение морской инфраструктуры	1	1	-
Технические всего из них:	38	29	45
повреждение главного двигателя	21	17	-
повреждение винто-рулевого комплекса	6	6	-
повреждение корпуса	7	1	3
повреждение судовых устройств	-	21	32
взрывы, пожары	4	5	7
потеря остойчивости, плавучести	-	2	3
Потеря буксируемого объекта	1	3	2
Получение тяжкого вреда, причинённого здоровью, случаев	1	3	5
Гибель человека, случаев	6	15	9
Всего погибших, человек	86	22	22
Всего получивших тяжкий вред, причинённый здоровью в прямой связи с эксплуатацией судна, человек	1	5	6
ИТОГО АС	72	82	84

Причины, повлекшие аварийные случаи:

- 1) недостатки в организации ходовой навигационной вахты и штурманской службы на судах;
- 2) несоблюдение общепринятых приёмов и способов управления судном;
- 3) не учёт гидрометеорологических особенностей района плавания и стоянки судов;
- 4) несоблюдение Правил технической эксплуатации морских судов, Правил технической эксплуатации судовых технических средств и конструкций.

В 2017 году на водном транспорте произошло 89 аварийных случаев (АС), что на 1 АС больше, чем в 2016 году.

Причины, повлекшие аварийные случаи:

- 1) недостатки в организации ходовой навигационной вахты и штурманской службы на судах;
- 2) несоблюдение общепринятых приёмов и способов управления судном;
- 3) не учёт гидрометеорологических особенностей района плавания и стоянки судов;
- 4) несоблюдение Правил технической эксплуатации морских судов, Правил технической эксплуатации судовых технических средств и конструкций, Положения о технической эксплуатации судов рыбной промышленности и должностных инструкций;

- 5) несоблюдение Правил взрывопожаробезопасности;

- 6) потеря остойчивости и плавучести;

- 7) несоблюдение Правил техники безопасности при швартовых и рыбопромысловых операциях, водолазных работах;

8) несоблюдение Правил техники безопасности, несчастный случай.

Теперь рассмотрим и проанализируем сведения об аварийности с судами на море и внутренних водных путях, которые произошли в первом квартале 2018 года в сравнении с первым кварталом 2017 года. Данные представлены в Таблицах 3 – 5.

Таблица 3

**Аварийные случаи с судами торгового мореплавания за первый квартал 2018 года**

ПОКАЗАТЕЛЬ	январь – март 2017	январь – март 2018
Всего, аварийных случаев	12	6
Очень, серьезные аварии	1	0
аварии	11	6
Аварии, связанные с гибелью людей и травматизмом	2	0
Погибших в прямой связи с эксплуатацией судна, человек	3	0
Из них пассажиров	0	0
Лощманский катер	1	-
Получивших тяжкий вред, причиненный здоровью в прямой связи с эксплуатацией судна, человек	0	0

В I квартале 2018 года на море произошло 15 аварийных случаев, что на 8 АС (35%) меньше, чем за этот же период 2017 года.

В I квартале 2018 года произошло 6 аварийных случаев с судами торгового мореплавания, что на 6 АС (50%) меньше, чем в январе-марте 2017 года.

Случаев гибели и травматизма за отчетный период не зарегистрировано (в январе-марте 2017 года произошло 2 АС, связанных с гибелью и травматизмом).

Таблица 4

**Аварийные случаи с судами рыбного промыслового флота за первый квартал 2018 года**

ПОКАЗАТЕЛЬ	январь – март 2017	январь – март 2018
ВСЕГО АВАРИЙНЫХ СЛУЧАЕВ	11	9
ОЧЕНЬ СЕРЬЕЗНЫЕ АВАРИИ	1	1
АВАРИИ	10	4
АВАРИИ, СВЯЗАННЫЕ С ГИБЕЛЬЮ ЛЮДЕЙ И ТРАВМАТИЗМОМ	2	5
Погибших в прямой связи с эксплуатацией судна, человек	3	22
из них пассажиров	0	0
Получивших тяжкий вред, причиненный здоровью в прямой связи с эксплуатацией судна, человек	1	2
из них пассажиров	0	0

Таблица 5

**Показатели аварийности на море по видам за первый квартал 2018 года**

Виды АС	январь – март 2017	январь – март 2018
Навигационные, всего из них:	6	3
навал	2	0
посадка на мель	1	1
столкновение	1	0
столкновение с притопленным предметом	1	1
ледовые повреждения	0	1
намотка буксирного троса на винт	1	0
Технические всего из них:	15	8
гибель судна	1	1
повреждение судовых устройств и механизмов	10	5
потеря остойчивости, плавучести	1	0
взрывы, пожары	3	2
Гибель человека, случаев	1	2
Получение тяжких телесных повреждений	1	2
Всего погибших, человек	6	22
Всего получивших тяжкий вред, причиненный здоровью в прямой связи с эксплуатацией судна, человек	1	2
ИТОГО АС	23	15

Причины, повлекшие аварийные случаи:

1) недостатки в организации ходовой навигационной вахты и штурманской службы на судах;

2) несоблюдение общепринятых приёмов и способов управления судном;

3) не учёт гидрометеорологических особенностей района плавания и стоянки судов;

4) несоблюдение Правил технической эксплуатации морских судов, Правил технической эксплуатации судовых технических средств и конструкций, Положения о технической эксплуатации судов рыбной промышленности и должностных инструкций;

5) несоблюдение Правил взрывопожаробезопасности;

6) несоблюдение правил техники безопасности при рыбопромысловых операциях.

Из приведенной выше статистики видно, что модернизация флота и интенсивное использование технологических систем управления безопасностью не совсем действенны, а все потому, что основной причиной аварийности является непрофессионализм, непредусмотрительность экипажа, т.е. «человеческий фактор».

Причины аварий на море могут быть разными: конструктивные или производственные дефекты, ошибки в эксплуатации, нарушение режимов работы и обслуживания механизмов, погодные условия, перегруженность акваторий, но 75-80% всех аварий на море происходят из-за ошибок человека.

Вышеуказанный анализ статистических данных Ространснадзора показывает, что причинами аварий являются: невыполнение командным составом требований, установленных в нормативных документах по безопасности судоходства; судоводительские ошибки; несоблюдение общепринятых приёмов и способов управления судном; невыполнение береговыми работниками требований, установленных в нормативных документах; непредвиденные обстоятельства, неудовлетворительное содержание ГТС; неудовлетворительное содержание пути, оборудования судовой ходы [6].

Если рассмотреть конкретные случаи аварий на море, то можно прийти к выводу, что количество аварий, а также их причины, остаются неизменными на протяжении нескольких десятилетий подряд.

Причиной аварии, произошедшей 31 августа 1986 года, когда п/х «Адмирал Нахимов» столкнулся с балкером «Петр Васёв», стало невыполнение судоводителями обоих судов требований МППСС-72, в результате чего «Адмирал Нахимов» затонул и погибло 423 человека.

Авария, случившаяся 16 января 2008 г. является еще одним доказательством влияния человеческого фактора на аварийность. Сухогруз «Mirabella» (флаг – Мальта) сел на мель при входе в Форд Харденгер, вблизи Бергена, Норвегия. Ровно за месяц до этого, 16 декабря, «Mirabella» с грузом леса уже была на мели, еще ранее, 3 марта 2005 года судно сталкивалось с опорой моста Большой Бельт [7].

28 августа 2010 года морской буксир «Алексей Кулаковский» вышел на помощь рыболовному траулеру «ТБ-0012». В штормовых условиях потерял ход, развернулся лагом к волне и затонул на глубине 20 м вблизи устья реки Лена. При выяснении причин гибели буксира возникло множество технических вопросов, подверглись сомнению капитанские решения, грамотность действий команды и компетентность лиц, ответственных за направление речного мелкосидящего буксира к месту аварии в открытом море [8].

20.11.2016 в 13:54 при швартовке танкера «DELTA PIONEER» правым бортом к нефтеналивному причалу № 1 морского порта Приморск, произошел навал танкера на пал № 6 причала. В результате навала был поврежден нефтеналивной причал № 1. Причинами аварии явились: превышение скорости движения танкера при швартовке к причалу в существующих метеоусловиях; самопроизвольная, несанкционированная отдача кормового буксирного каната, поданного с буксира «РН ПОСЕЙДОН» на танкер, во время швартовки танкера: ошибки, допущенные капитаном судна и лоцманом при анализе и оценке ситуации с танкером с момента самопроизвольной отдачи кормового буксира; несогласованность в действиях капитана танкера и лоцмана, выразившаяся в разногласиях по режиму работы ГД и моменту отдачи якоря [3] и др.

С учетом вышеизложенного, а именно из рассмотренной статистики и анализа аварий на море, можно сделать следующие выводы:

1. 75-80% всех аварий на море происходят по вине судоводителей или судового персонала, так как квалификации командного состава морских судов в

обеспечении безопасного мореплавания находится на низком уровне и не гарантирует безопасность;

2. Судходные компании не обеспечивают регулярную аттестацию членов экипажей судов, не проводят в достаточном размере различные тренинги по повышению квалификации, в том числе по освоению новых технических средств судовождения;

3. Морские учебные и научные учреждения при обучении курсантов не уделяют должного внимания исследованиям в области безопасности мореплавания;

4. Руководящая и операторская деятельность человека на судне информационно перегружена и плохо обеспечена технологией принятия управленческих решений, учитывающей психологическое состояние человека, особенно в экстремальных ситуациях.

5. Недостаточное внимание уделяется проблеме влияния «человеческого фактора» на безопасность мореплавания, это говорит о недостаточной изученности данного явления, понятие «человеческого фактора» и его составляющие в необходимом для правильного и эффективного толкования объеме не закреплены на законодательном уровне;

6. Суда укомплектованы экипажем в недостаточном количестве (минимальном составе), чтобы обеспечивать безопасность мореплавания, т.к. экипажи судов подвергаются большой нагрузке, что способствует повышению уровня усталости членов экипажей, которая со временем накапливается и приводит к негативным последствиям в виде ошибок человека [6].

## **2. «Человеческий фактор» - как одна из характеристик безопасности в море**

В данном разделе вначале предлагаем раскрыть понятие «человеческий фактор», а затем определить из чего он складывается.

Анализ аварий, лежащих в области действия «человеческого фактора», показывает, что они произошли в результате неверно принятых решений, либо вообще не принятых решений, иными словами - бездействия. Это означает, что для поисков путей воздействия на этот вид аварийности необходимо ответить на вопрос о причинах принятия неверных решений операторами или их бездействия. Так, при анализе аварийных ситуаций, когда речь идет, как правило, лишь о нахождении виновных и определении степени их виновности, прежде всего, нужно исследовать и учесть целый ряд обстоятельств психологического характера, связанных с психофизиологическими особенностями и возможностями конкретных людей и психологической спецификой воздействовавшей на них ситуации.

Явление «человеческий фактор» стало приобретать официальный статус совсем недавно, вследствие чего, его суть, характеристики, причины возникновения, последствия и специфика недостаточно изучены. На протяжении долгого времени достаточного внимания данному явлению не уделялось и, поэтому, негативные последствия его влияния недооценивались.

Анализируя аварии и инциденты на море, произошедшие за последние 30 лет, международное

морское сообщество постепенно отошло от одностороннего подхода, который был сфокусирован лишь на технических требованиях к конструкции и оборудованию судна, и в полной мере признало роль человеческого фактора в безопасности мореплавания и более детально стало регулировать его в рамках всей морской отрасли.

В 1996 году Международная морская организация совместно с Международной организацией труда создала специальную рабочую группу экспертов по человеческому фактору, которая подготовила проект Руководства по расследованию человеческих факторов в авариях и инцидентах на море. Но данное Руководство не включили в принятый в 1997 году на 70-й сессии ассамблеи ИМО «Кодекс проведения расследований аварий и инцидентов на море» (резолюция А.849(20)).

Позже оно было одобрено на сессии Комитета по безопасности на море и Комитета по защите морской окружающей среды и в окончательном виде принято на 71-й сессии Ассамблеи ИМО в качестве резолюции А.884(21) как поправки к упомянутому Кодексу [9].

Во введении Руководства в пункте 1.6 человеческий фактор в целом определен как «действия или упущения, преднамеренные или совершенные иным образом, которые отрицательно сказываются на надлежащем функционировании соответствующей системы или выполнении конкретной задачи» [10].

Данное определение не является исчерпывающим, поэтому необходимо разработать более точное и развернутое определение, которое бы полностью отражало всю суть данного явления.

В связи с чем, предлагается заменить определение «человеческого фактора», данное в п. 1.6 введения Руководства по расследованию «человеческих факторов» в авариях и инцидентах на море следующим определением: «Человеческие факторы, способствующие возникновению морских аварий и инцидентов, могут быть в целом определены как действия или упущения, которые совершаются человеком преднамеренно или иным образом в результате недостатков информационного обеспечения; ограничений, обусловленных проявлениями внешних факторов; ограничений, вызванных физическим и психологическим состоянием и свойствами человека; ограниченности ресурсов поддержки и исполнения принятого решения, и отрицательно сказывающиеся на надлежащем функционировании соответствующей системы или выполнении конкретной задачи» [10].

Специалисты считают, что уровень аварийности сохраняется также по причине радикального уменьшения численности экипажей судов в целях сокращения эксплуатационных расходов судовладельцами, несмотря на то, что суда становятся все более оснащенными. Вследствие чего на экипаж возрастают физические и психологические нагрузки, что также относится к человеческому фактору.

Трудно не заметить, что везде присутствует фактор, который оказывает большое влияние на безопасную эксплуатацию судна, - экономический прессинг. Да, судоходство должно приносить прибыль, и желательно высокую, но эксплуатация судов и их экипажей на пределе возможностей

приводит к возникновению различного рода происшествий и аварий.

«Должно задуматься о том, что чрезмерное сокращение экипажей и сотрудников управлений ради повышения экономических показателей может иметь обратный эффект и быть дополнительным источником грядущих аварий и катастроф», - говорит Виктор Соколов, профессор Института последипломного образования моряков.

Документы, такие как ПДМНВ-78/95, СОЛАС-74, Резолюции ИМО А.890(21) («Принципы определения безопасной численности экипажей»); А.772 (18) («Факторы усталости при укомплектовании экипажей и обеспечении безопасности») и др., указывают на то, что на море все суда должны быть укомплектованы экипажами в надлежащем числе в целях обеспечения безопасности судна. Резолюция 6 Международной конвенции о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты гласит, что Конвенция и Кодекс ПДНВ являются документами, касающиеся стандартов подготовки и дипломирования, и не устанавливают уровней укомплектования судов экипажами, а любое решение, относящееся к уровню укомплектования судов, является обязанностью соответствующих Администраций и собственников судов.

Следовательно, на международном уровне четко не регламентируется численность экипажей судов, а также не определено количество вахт, необходимой для обеспечения безопасности мореплавания.

Учитывая то, что сокращение численности экипажей судов является причиной аварийности на море, предлагается включить в международные конвенции СОЛАС-74, ПДМНВ-78 и др. следующую норму: «На судах вместимостью более 500 т должна трехсменная вахта и не менее 3 судоводителей, 3 механиков (электромехаников) и 1 радиста, имеющих соответствующие дипломы, а также необходимое число других членов экипажа для обеспечения трехсменной вахты».

В качестве еще одного направления на противодействие явлению «человеческий фактор», выступает повышение уровня профессиональной подготовки членов экипажа судна, предусматривающее внедрение специальных курсов в цикл их профессиональных программ обучения, которые направлены на совершенствование качества подготовки в сфере межличностного взаимодействия, принятия решений в экстремальных ситуациях, умения осуществлять эффективное руководство подчиненными, управление современным навигационным оборудованием и ресурсами ходового мостика.

В России все программы профессионального обучения разрабатываются на основе профстандартов, создание которых координирует Министерство труда и социальной защиты Российской Федерации и которые представляют собой характеристику квалификации, необходимой работнику и включающую в себя требования к навыкам и умениям, а также к опыту работы.

В соответствии с Конвенцией ПДНВ 1978 года, Положением о дипломировании членов экипажей морских судов, утвержденным приказом Минтранса России от 15 марта 2012 года № 62 Росморречфлотом согласованны примерные программы подготовки для морских



образовательных организаций, примерных программ подготовки для учебно-тренажерных центров, программа для членов экипажей судов, плавающих под российским флагом и др. [11].

Поскольку наиболее частой причиной аварий выступает низкая подготовка членов экипажей судов, необходимо пересмотреть примерные программы подготовки судоводителей, размещенные на официальном сайте Федерального агентства морского и речного транспорта РФ, и внести в них изменения, которые будут способствовать снижению данного аспекта «человеческого фактора».

В связи с чем, предлагается включить в Раздел 5 примерных программ подготовки капитана, старшего помощника капитана, в Раздел 2 примерных программ курсов для продления диплома капитана, старшего и вахтенного помощника капитана учебную дисциплину «Человеческий фактор» - как одна из мер обеспечения безопасности в море» и выделить на ее изучение дополнительные часы в программе подготовки.

В соответствии со статистикой Ространснадзора, мы видим, что наиболее частыми причинами аварий являются невыполнение судоводителями или судовым персоналом требований, установленных в нормативных документах по безопасности судоходства, судоводительские ошибки, недостатки в организации ходовой навигационной вахты и несоблюдение общепринятых приемов и способов управления судном предлагается в примерные программы подготовки капитана и старшего помощника капитана включить увеличение

количества часов с 120 часов до 150 часов, а в примерные программы курсов для продления диплома капитана, старшего и вахтенного помощника капитана с 40 часов до 50 часов.

### Заклучение

Состояние безопасности на морском транспорте в настоящее время рассматривается как аварийное, количество аварий и их причины, остаются неизменными на протяжении нескольких десятилетий подряд.

Эти обстоятельства позволяют нам сделать следующий вывод, что существует острая необходимость совершенствования нормативно-правовых актов в целях сведения до минимума влияния «человеческого фактора» на аварийность морского флота.

«Человеческий фактор», как показывает рассмотренная и проанализированная в данной работе статистика, является одной из основных проблем безопасности мореплавания и, следовательно, требует повышенного внимания, как со стороны судоводителей и судового персонала, специалистов береговых служб управления движением судов и преподавателей морских вузов, портовиков и лоцманов, так и со стороны международных и национальных организаций в целом.

Безопасность на море это проблема мирового масштаба, и решить ее можно только совместными усилиями всех участников данного процесса.

### Литература

1. Анцелевич А. Г. Международное морское право: Учебник. - К. : Слово, 2008. – 375 с.
2. Морской энциклопедический словарь [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.encyclopedia.ru](http://www.encyclopedia.ru) (дата обращения 17.05.2018).
3. Гуцуляк Н. В. Международное морское право: Учебник. – М. : Центр морского права, 2006 – 410 с.
4. Авраменко В. Д., Касаткин П. И. Повышение безопасности мореплавания и причины аварийности морских судов // Вестник МГТУ. - 2013. - № 6-4. – С. 208-210.
5. Прус М. В., Боевич В. Д. Международно-правовые аспекты безопасности мореплавания. – Одесса : Латстар, 2011. – 152 с.
6. Сборник характерных аварийных случаев на море и внутренних водных путях, произошедших в 2015-2017 годах с судами, плавающими под флагом РФ - [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://sea.rostransnador.ru/wp-content/uploads/sites/5/2015/01/Sbornik-harakterny-h-AS.-2016.-2.pdf> (дата обращения 09.11.2017).
7. Голиков И. В., Потапов А. Е., Шафран М. Л. Профессиональная компетентность плавсостава и аварии морских судов // Вестник МГТУ. - 2015. - № 8. - С. 54–65.
8. Честяков В. И. Безопасность на море и ответственность капитанов // Судоходство. –2009. – № 4 - 6. – С. 87-94.
9. Скороходов А. Д., Борисова Ф. Л., Борисов Д. В. Категории и принципы обеспечения безопасности мореплавания // Вестник МГТУ. - 2015. - №5-1. С. 546-547.
10. Руководство по расследованию человеческих факторов в авариях и инцидентах на море (Резолюция ИМО от 25 ноября 1999 № А.884(21)) [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.gfi.chat.ru/imo/A884\(21\).htm](http://www.gfi.chat.ru/imo/A884(21).htm) (дата обращения: 17.05.2018).
11. Приказ Минтранса РФ от 15.03.2012 № 62 (ред. от 13.05.2015) "Об утверждении Положения о дипломировании членов экипажей морских судов" // Собрание законодательства РФ, 20.03.2012, № 46, ст. 3781.

### References

1. Ancelevich AG International Maritime Law: A Textbook. - K.: Word, 2008. - 375 with.
2. Marine Encyclopaedic Dictionary [Electronic resource] - Access mode: [www.encyclopedia.ru](http://www.encyclopedia.ru) (the date of circulation is May 17, 2018).
3. Gutsulyak NV International Maritime Law: A Textbook. - M.: Center for the Law of the Sea, 2006 - 410 p.
4. Avramenko VD, Kasatkin PI Improving the safety of navigation and the causes of accidents in sea vessels // Vestnik MSTU. - 2013. - No. 6-4. - P.208-210.
5. Prus MV, Boevich VD International legal aspects of maritime safety. - Odessa: Latstar, 2011. - 152 p.

6. Collection of characteristic accidents at sea and inland waterways that occurred in 2015-2017 with vessels flying the flag of the Russian Federation - [electronic resource]. Access mode: <http://sea.rostransnadzor.ru/wp-content/uploads/sites/5/2015/01/Sbornik-harakterny-h-AS.-2016.-2.pdf> (circulation date 09.11.2017).
7. Golikov IV, Potapov A. Ye., Shafran ML Professional competence of the crew and the accident of marine vessels // Vestnik MSTU. - 2015. - No. 8. - P. 54-65.
8. Chestyakov V. I. Safety at sea and the responsibility of captains // Shipping. -2009. - No. 4 - 6. - P. 87-94.
9. Skorokhodov AD, Borisova FL, Borisov DV Categories and principles of ensuring safety of navigation // Vestnik MSTU. - 2015. - №5-1. Pp. 546-547.
10. Guidelines for Investigating Human Factors in Accidents and Incidents at Sea (IMO Resolution No.884 of November 25, 1999) [Electronic resource] - Access mode: [http://www.gfi.chat.ru/imo/A884\(21\).htm](http://www.gfi.chat.ru/imo/A884(21).htm) (date of circulation: 05/17/2018).
11. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation from 15.03.2012 No. 62 (Ed. Of May 13, 2015) "On approval of the Regulation on the certification of crew members of sea-going vessels" // Collection of Legislation of the Russian Federation, 20.03.2012, No. 46, art. 3781.

УДК 656. 61

## ГОСУДАРСТВЕННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ МОРСКОЙ СРЕДЫ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ РАЗЛИВОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ НА МОРЕ С СУДОВ: СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ

**Александр Анатольевич Луговец**

доктор экономических наук, доцент  
профессор кафедры Управления морским транспортом  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
е-мэйл: alal@list.ru

**Валерий Анатольевич Курбенков**

кандидат политических наук  
заведующий кафедрой Морского права  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
е-мэйл: kurbenkov@msun.ru

### Аннотация

В настоящее время определилось несколько основных направлений, по которым возникают угрозы Мировому океану в результате его использования: высокая интенсивность рыболовства и несоблюдение в большинстве случаев интересов воспроизводства рыбных и некоторых других водных биологических ресурсов; загрязнение морских вод сточными водами промышленных предприятий, нефтью и нефтепродуктами при перевозке их по морям и океанам, отходами атомного производства, чужеродными видами, при морском бурении и т.д. Несмотря на многочисленные меры по улучшению безопасности использования морской среды, в водах Мирового океана все еще эксплуатируются суда, находящиеся в ненадежном состоянии, вдобавок перевозящие очень вредные для окружающей среды грузы; они становятся причиной масштабного ущерба, наносимого окружающей среде в результате аварий, при этом виновные в нанесении ущерба часто уходят от ответственности. В Морской доктрине Российской Федерации (утв. Президентом РФ 26.07.2015) установлено, что к одним из основных национальных интересов Российской Федерации в Мировом океане относится предотвращение загрязнения морской среды.

**Ключевые слова:** загрязнения океана, сохранение морской среды, государственное регулирование, морской транспорт, нефть и нефтепродукты, перевозка, нанесение ущерба, юридическая ответственность

## STATE REGULATION OF SECURITY MARINE ENVIRONMENT AND PREVENTION OF OIL AND OIL SPILL RESPONSES ON THE SEA FROM SHIPS: STATE, PROBLEMS, SOLUTIONS

**Aleksandr A. Lugovets**

Associate professor, Dr. Sci. Economics  
Professor of department of Maritime transportation management  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
e-mail: alal@list.ru

**Valery A. Kurbenkov**

Cand. Sci. Politics  
Director of department of Law of the sea  
Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoi  
Verkhneportovaya, 50a. Vladivostok 690069  
E-mail: kurbenkov@msun.ru

### Abstract

At the present time, several main areas have been identified that threaten the World Ocean as a result of its use: high intensity of fishing and non-compliance in most cases with the interests of reproduction of fish and some other aquatic biological resources; pollution of sea waters by sewage from industrial enterprises, oil and petroleum products when transporting them through the seas and oceans, nuclear waste, alien species, in offshore drilling, etc. Despite numerous measures to improve the safety of the use of the marine environment, ships in an unreliable state are still operating in the waters of the World Ocean, in addition, they carry very harmful to the environment cargoes; they are the cause of large-scale damage to the environment as a result of accidents, and the perpetrators of damage often escape responsibility. The Maritime Doctrine of the Russian Federation (approved by the President of the Russian Federation on July 26, 2015) establishes that one of the main national interests of the Russian Federation in the world's oceans is the prevention of pollution of the marine environment.

**Key words:** marine pollutions, preservation of the marine environment, state regulation, sea transport, oil and oil products, transportation, damage, legal responsibility

**Введение**

К 2020 г. намечается увеличение добычи нефти и газоконденсата до 450–520 млн. т/год [1]. Очищенные нефтепродукты постоянно расходуются на удовлетворение более 60 % мировых энергетических потребностей. В связи с этим практически невозможно применять продукты в таких количествах без некоторых потерь. Количество потерь, предусмотренных или случайных, постоянно растет, поэтому загрязнение моря, как сырой нефтью, так и продуктами ее переработки сегодня – предмет серьезного беспокойства. Нефть и нефтепродукты являются одним из наиболее опасных загрязняющих веществ (до 3 000 ингредиентов), многие из которых ядовиты для любых живых организмов [2]. Общее количество нефти и нефтепродуктов, попадающих ежегодно в океан, по оценкам разных исследователей составляет от 6 до 12 млн. т. Поступление нефти в Мировой океан составляет примерно 0,23 % от годовой мировой добычи нефти [3].

Несмотря на многочисленные меры по улучшению безопасности использования морской среды, в водах Мирового океана все еще эксплуатируются суда, находящиеся в ненадежном состоянии, вдобавок перевозящие очень вредные для окружающей среды грузы; они становятся причиной масштабного ущерба, наносимого окружающей среде в результате аварий. Это подтверждается событиями, произошедшими в Керченском проливе 11 ноября 2007 г., по причине сильного шторма там затонули танкер и три сухогруза. Еще один корабль затонул в Черном море. Первым в Керченском проливе надвое переломился российский танкер «Волгоневфть-139». В результате аварии в воду вылилось 1,3 тыс. т. мазута. 8 декабря 2007 года танкер «Хэбэй спирит» (Hebei Spirit) столкнулся с плавучим краном в десяти километрах от берега Южной Кореи к северо-западу от порта Маллипхо. По информации южнокорейских СМИ, в море вылилось около 15 тыс. тон сырой нефти. Эти примеры, к сожалению, не единственные.

Следует отметить, что нефтяные аварии не являются единственной проблемой. Большая часть загрязнения нефтью с судов вызвана все же преднамеренными сбросами ее в море. Практикуемые «производственные», сбросы с судов, включая очистные емкости и удаление отработанного масла, постоянно осуществляются в территориальных водах государств-членов ЕС, в открытом море и в российских территориальных водах. Даже если количество подобных деяний будет снижаться в результате применения различных, используемых на международном уровне, уровне Европейского Союза и национальном уровне отдельных государств мер по уменьшению загрязнения морей с судов, эта проблема технологически и юридически будет решена не скоро [4].

Несомненно, юридическая ответственность это один из инструментов защиты окружающей среды, в том числе и морской. Однако в России вопрос реализации юридической ответственности за экологические преступления, в том числе за

загрязнение морской среды, стоит крайне остро. Так, уголовные дела о самых массовых и опасных нарушениях - таких, как загрязнения водного, воздушного бассейнов составляют 0,96% от общего числа экологических преступлений. Меры дисциплинарной и административной ответственности за нарушение правил охраны и использования морской среды применяются крайне редко. Безусловно, юридическая ответственность является лишь одним из многих правовых инструментов, используемых для охраны ресурсов моря, но повышение ее эффективности необходимо [5].

**1. Государственное регулирование предупреждений и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на море с судов**

Понять и разобраться в институте юридической ответственности за нарушение экологического законодательства, а также в системе мер и требований в отношении охраны морской среды от загрязнения дают нам возможность труды таких авторов как С. А. Боголюбова, Г. А. Волкова, А. К. Голиченкова, И. А. Игнатъевой, О.С. Петрова, и др.

Выявить основные тенденции международного правового регулирования в сфере охраны морской среды и ее ресурсов позволили работы специалистов по морскому и международному праву - К. А. Бекяшева, В. Н. Гуцуляка, А. Н. Вылегжанина, В. Г. Ермолаева, О. В. Сивакова и др.

Рассматривая вопросы загрязнения морской среды нефтью, многие авторы, а именно в области экологии (Л. В. Передельского, В. И. Коробкина и др.), морской биологии (А. Л. Верещаки, К. В. Беклемишева и др.), химии (Л. С. Астафьевой, П. П. Кукина и др.) выделяют загрязнение морской среды нефтепродуктами с судов как постоянного так и аварийного характера.

Главными причинами загрязнения моря нефтью с судов считаются: а) повреждение судна в результате аварийного происшествия; б) намеренный сброс нефти или нефтепродуктов с судна; в) разлив нефти во время грузовых или бункеровочных операций; г) незначительные выбросы нефтепродуктов во время обычной эксплуатации судна [6].

На диаграмме (Рис. 1) представлены основные источники загрязнения морских вод нефтепродуктами. В соответствии с данной диаграммой, перевозка нефти морем является вторым по величине источником загрязнения после речных стоков и составляет 20 процентов от всех источников загрязнения морской среды [7].



Рис. 1. Источники загрязнения морской среды

Также можно проследить и увеличение объема перевозок нефтепродуктов морским флотом, например, в Балтийском море, различных стран к 2015 г. по данным научно-исследовательского института VTT (см. Таблицу 1).

Таблица 1

**Увеличение объема перевозок нефтепродуктов морским флотом в Балтийском море к 2015 г.**

№ п/п	Страна	Общий объем перевозок, млн. т.
1	Швеция (2 %)	200,5
2	Финляндия (2 %)	125,0
3	Россия (7 %)	100,0
4	Эстония (4 %)	48,5
5	Латвия (2 %)	60,5
6	Литва (4 %)	20,5
7	Польша (4%)	90,0
8	Германия (2 %)	76,5
9	Дания (2 %)	138,0
10	Норвегия (2%)	132,5
Сумма		972,0

Основные положения международно-правовой защиты и сохранения морской среды воплощены в Конвенции ООН по морскому праву 1982 года, в которой установлены общие принципы в области охраны морской среды и предусмотрены конкретные меры по предотвращению загрязнения моря из различных источников, в том числе с судов [8].

Помимо Конвенции 1982 г., существует ряд конвенций, регулирующих вопрос загрязнения морской среды нефтью. Так, Конвенция об открытом море 1958 г. закрепляет за государствами обязанность осуществлять действия по предупреждению загрязнения морской среды нефтепродуктами. Конвенция о континентальном шельфе 1958 г. обязывает прибрежное государство принимать необходимые меры охраны морских живых ресурсов от вредного воздействия.

Хотя конвенция ОЙЛПОЛ считается действующей, однако в полной мере она не применяется. Её положения были закреплены в Приложении I «Правила предотвращения загрязнения нефтью» в Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ 73/78), вступившей в силу 2 октября 1983 года. В конвенции МАРПОЛ 73/78 дано определение нефти. [9].

Помимо регулирования вопросов по предотвращению загрязнения моря нефтью Конвенция МАРПОЛ 73/78 также содержит положения по борьбе с другими видами загрязнения с судов. Конвенция запрещает сливать в море нефть и нефтеводяные смеси, а также других ядовитые вещества, сточные воды во всей акватории Мирового океана, за исключением случаев аварийного характера. Также Конвенция устанавливает унифицированные международные стандарты по предотвращению загрязнения и устанавливает особые районы, в которых установлен особый жесткий режим, где сброс опасных веществ категорически запрещен. Помимо этого, суда во время нахождения в особом районе обязаны сохранить на борту все нефтяные остатки и осадки, грязный балласт и промывочную воду, а потом сдать их в приемные устройства [10].

Рассмотрим крупнейшие в истории судоходства разливы нефти и нефтепродуктов приведенные в Таблице 1.

Основные очаги загрязнения морской среды при аварийных разливах нефти сосредоточены либо в местах ее добычи (на нефтяных промыслах), либо на маршрутах транспортировки добытого углеводородного сырья к местам переработки и потребления [11].

Крупные экологические катастрофы, связанные с разливом нефти на море, нередко становились предпосылкой для обсуждения проблемы загрязнения мирового океана нефтью и для разработки международных конвенций. В Таблице 2 представлены наиболее масштабные и имеющие большой общественный резонанс случаи аварийных разливов нефти, также указано количество разлитой нефти в тоннах и год катастрофы.

Возмещение ущерба, вызванного загрязнением моря нефтью, регулируется Международной конвенцией о гражданской ответственности за ущерб от загрязнения нефтью 1969 г. (CLC-69), которая впоследствии была заменена Протоколом 1992 г. с поправками 2000 г. Данная Конвенция основана на принципе гражданско-правовой ответственности судовладельца за ущерб от загрязнения нефтью и предусматривает систему обязательного страхования. Для реализации механизма полного возмещения ущерба от загрязнения была принята Международная конвенция о создании Международного фонда для компенсации ущерба от загрязнения нефтью 1971 г.

Таблица 2

**Крупные разливы нефти при аварии танкеров**

Наименование судна	Год	Объем разлива, т	Место
Torrey Canyon	1967	119 000	Острова Силли, Великобритания
Amoco Cadiz	1978	223 000	У Бретани, Франция
Atlantic Empress	1979	287 000	У острова Тобаго (Карибское море)
Castulo dt Bellver	1983	252 000	У берегов Южной Африки
Odissey	1988	132 000	700 миль от Новой Шотландии
ABT Sammer	1991	260 000	700 миль от Анголы
Haven	1991	144 000	Генуя, Италия
Aegean Sea	1992	74 000	Ла Корунья, Испания
Katina P	1992	72 000	У Мапуту, Мозамбик
Braer	1993	85 000	Шетландские острова, Великобритания
Sea Empress	1996	72 000	Милфорд Хавен, Великобритания

В 1990 г. заключена Международная конвенция по обеспечению готовности на случай загрязнения нефтью, борьбе с ним и сотрудничеству, которая посвященная способам предотвращения разливов нефти и взаимодействию государств в борьбе с ними. Согласно Конвенции на борту судов должны быть разработаны оперативные планы по борьбе с загрязнением нефтью. Каждое судно обязано

сообщать прибрежным властям о каждом случае загрязнения, а также о предпринятых в связи с этим мерах.

В российском законодательстве основные принципы по охране окружающей среды закреплены в статье 42 Конституции РФ (право на благоприятную окружающую среду; право на достоверную информацию о состоянии окружающей среды; право на возмещение ущерба, причиненного имуществу или здоровью человека экологическим правонарушением) [12].

Так как Россия ратифицировала в 1997 г. Конвенцию ООН по морскому праву 1982 года, то некоторые ее положения, в том числе касающиеся защиты и сохранения морской среды, нашли отражение в национальных актах «О внутренних морских водах, территориальном море и прилегающей зоне РФ» 1998 г., «Об исключительной экономической зоне РФ» 1998 г., «О континентальном шельфе» 1995 г.

В России вопросы охраны окружающей среды определяются федеральным законом от 26 декабря 2001 года № 7–ФЗ «Об охране окружающей среды». Законом установлен принцип «загрязнитель платит за загрязнение», а также другие принципы охраны окружающей среды [13].

Гражданско-правовые вопросы предотвращения загрязнения морской среды закреплены в главе XVIII Кодекса торгового мореплавания (КТМ) [14], которая посвящена ответственности за ущерб от загрязнения с судов нефтью.

Сбор и удаление остатков опасных грузов производится в соответствии с «Наставлением по предотвращению загрязнения с судов», введенным в действие Приказом Госкомрыболовства РФ от 27.05.1999 № 134 и действующим по настоящее время. Подготовка этого документа была осуществлена на основе анализа норм конвенции МАРПОЛ и законодательства РФ.

Деятельность организаций, которые осуществляют добычу, переработку и транспортировку нефти и нефтепродуктов в море, а также органов государственной власти, аварийно-спасательных формирований по ликвидации разливов нефти, регулируется законодательством в сфере предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. К основным нормативным актам, регулирующим деятельность в этой области, относятся:

1. Федеральный закон от 21.12.1994 № 68–ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»;

2. Федеральный закон от 30.03.1999 № 52–ФЗ (ред. от 29.07.2017) «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения»;

3. Федеральный закон от 22.08.1995 № 151–ФЗ (ред. от 18.07.2017) «Об аварийно-спасательных службах и статусе спасателей»;

4. Постановление Правительства РФ от 21.08.2000 № 613 «О неотложных мерах по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов»;

5. Постановление Правительства РФ от 15.04.2002 № 240 (ред. от 14.11.2014) «О порядке организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории РФ» и др.

Финансирование работ по ликвидации разлива нефти осуществляется в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 26.08.1994 № 989 «О порядке финансирования мероприятий по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на промышленных предприятиях, в строительстве и на транспорте».

С целью защиты морской среды от загрязнения нефтью в результате неаварийных выбросов нефтепродуктов, происходящих в результате обычной эксплуатации судна, было принято Постановление Правительства РФ от 13.сентября 2016 года № 913 «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах» и Постановление Правительства РФ от 24 марта 2000 года № 251 «Об утверждении перечня вредных веществ, сброс которых в исключительной экономической зоне РФ с судов, других плавучих средств, летательных аппаратов, искусственных островов, установок и сооружений запрещен».

Деятельность по перевозке нефтепродуктов на море судами является вторым по величине источником загрязнения морской среды нефтепродуктами. Проблема загрязнения моря нефтью с судов признана многими странами как серьезная угроза экологии и является объектом внимания крупных международных организаций. Для обеспечения действий положений международных конвенций по предотвращению и ликвидации загрязнения морской среды нефтепродуктами, участником которых является Российская Федерация, в российском законодательстве приняты национальные нормы, которые во многом коррелируют с положениями международных конвенций.

## 2. Проблемы применения ответственности за разлив нефти на море

Одним из инструментов государственного регулирования охраны окружающей среды от загрязнения в результате разлива нефти с судов является установление уголовной ответственности за разлив нефти. В правовой доктрине выделяют две функции уголовной ответственности: карательную и предупредительную (превентивную) [20].

Одной из проблем уголовной ответственности за разлив нефти на море является разграничение конкурирующих составов. В теории уголовного права в качестве конкурирующих принято рассматривать нормы, находящиеся в соотношении общего и особенного, целого и части [21].

В УК РФ существуют несколько конкурирующих составов преступлений, устанавливающих ответственность за противоправное посягательство на водные объекты. Наиболее часто встречающейся проблемой, возникающей при квалификации преступных деяний, связанных с загрязнением водных объектов, считается разрешение конкуренции между нормами ч. 2 ст. 247 УК РФ и ч. 1, 2 ст. 250 УК РФ, ч. 1, 2 ст. 252 УК РФ. Надлежащее разграничение составов этих преступлений имеет важное значение для квалификации противоправного деяния.

Спорным является вопрос о соотношении указанных норм как общих и специальных. Большая часть специалистов считает ч. 2 ст. 247 УК РФ общей

нормой по отношению к ст. ст. 250 – 254 УК РФ [22]. Однако есть и противоположная точка зрения, согласно которой ч. 2 ст. 247 УК РФ является специальным составом по отношению к составу различных компонентов окружающей среды: морской среды (ст. 252 УК РФ), вод (ст. 250 УК РФ), атмосферы (ст. 251 УК РФ), земли (ст. 254 УК РФ). Также существует третья точка зрения, согласно которой формула соподчинения специальной нормы общей, основанная на положениях ч. 3 ст. 17 УК РФ, не работает по отношению к нормам, содержащимся в ст. ст. 250, 252 и 247 УК РФ. [23].

В судебной практике деяния, связанные с разливом нефтепродуктов на море нередко квалифицируются по-разному. Так, в результате аварийного случая с судном «Надежда» произошла утечка нефтепродуктов в акваторию морского порта Невельск и прилегающую акваторию Татарского пролива, загрязнив акваторию водного объекта площадью 23500 кв.м. и береговую полосу на протяжении 7,2 км. Капитан судна согласно приговору Невельского городского суда Сахалинской области от 15 сентября 2016 года признан виновным в совершении преступления, предусмотренного ч. 2 ст. 247 УК РФ.

В другом случае, т.е. 05 апреля 2014 года во время погрузки бункерного топлива - мазута, с бункеровочного судна «Орион А» на судно «CRUX» в результате допущенных нарушений и отсутствия контроля за наполнением центрального топливного танка № 2 со стороны третьего механика произошло переполнение топливного танка и разлив нефтепродукта - мазута, на палубу судна «CRUX», с последующим сбросом нефтепродукта в количестве 1 410,045 кг. на поверхность морской среды акватории Черного моря у причала порта Новороссийск. Приговором Ленинского районного суда г. Новороссийска № 1-59/2014 от 05 июня 2014 года третий механик признан виновным в совершении преступления, предусмотренного ч. 1 ст. 252 УК РФ.

Решение данного вопроса мы видим в разъяснении на уровне Верховного суда РФ вопросов соотношения составов преступлений главы 26 УК РФ, связанных с загрязнением водных объектов. Такое разъяснение будет способствовать единообразному применению данной нормы российскими судами.

Помимо уголовной ответственности в российском законодательстве предусмотрена административная ответственность за несоблюдение экологических и санитарно-эпидемиологических требований при обращении с нефтепродуктами, нарушение требования по организации предупреждения и ликвидации разливов нефти, за сокрытие и искажение экологической информации и др.

Наиболее часто встречающимся нарушением требований охраны водных объектов, создающим угрозу загрязнения водного объекта нефтепродуктами, является ненадлежащая установка боновых заграждений при осуществлении бункеровочных операций в соответствии с пунктом 74 обязательных постановлений в морском порту Владивосток, утвержденных приказом Министерства транспорта РФ от 02.07.2013 № 229 [24]. Невыполнение указанных выше требований является основанием для привлечения к

административной ответственности по ст. 8.13 КоАП РФ. Так, Тихоокеанским морским управлением Росприроднадзора в октябре 2016 г. был выявлен факт осуществления бункеровки теплоходом «Витязь» иностранного судна EASTERN DREAM с нарушением обязательных требований по бункеровки в порту Владивосток. Боновое заграждение заканчивалось в районе кормовой части судна «Витязь» в пределах левого борта судна EASTERN DREAM, тем самым оставляя носовую часть судна EASTERN DREAM незакрытой, что могло повлечь загрязнение акватории бухты Золотой Рог при аварийном разливе нефтепродуктов. По данному факту Тихоокеанским морским управлением Росприроднадзора было возбуждено дело об административном правонарушении по ч. 4 ст. 8.13 КоАП РФ в отношении собственника судна [25].

Решить данную проблему на данном этапе можно путем увеличения наказания за несоблюдение правил охраны водных объектов. Предлагается внести изменение в ч. 4 ст. 8.13 КоАП РФ, увеличив наказание за совершение данного правонарушения.

Еще одной проблемой является отсутствие в КоАП РФ специальных норм, устанавливающих ответственность за соблюдение правил по предотвращению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на море с судов. Разливы нефти, повлекшие за собой негативное воздействие на окружающую среду и нарушение условий жизнедеятельности населения, рассматриваются как чрезвычайные ситуации в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 21.05.2007 № 304 «О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» и предполагают организацию их ликвидации в соответствии с законодательством в области ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Статьей 20.6 КоАП РФ предусмотрена административная ответственность за невыполнение требований по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Тем не менее, данной статьей не учитывается самостоятельный предмет регулирования сферы деятельности по предупреждению и ликвидации разливов нефтепродуктов на море с судов.

Для стимулирования соблюдения специальных требований по организации предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов необходимо создать специальную статью в КоАП РФ, которой будет предусматриваться ответственность за нарушение других специальных требований для предотвращения и ликвидации разливов нефти на море с судов.

Анализ регулирования дисциплинарной ответственности показывает, что выявление ее прямой природоохранной функции является сложной задачей, так как основными целями этого вида ответственности являются обеспечение трудовой дисциплины, выполнение правил трудового распорядка.

Однако поскольку дисциплинарная ответственность призвана обеспечивать выполнение работниками своих обязанностей (превентивная функция), в том числе касающихся охраны и использования морской среды, а также ввиду того, что применение некоторых видов дисциплинарных взысканий (например, увольнения) способствует



тому, что виновное лицо не может более создавать угрозу окружающей среде в ходе своей деятельности, следовательно применение дисциплинарной ответственности только повышает уровень охраны окружающей среды, в том числе и морской.

В заключении необходимо отметить, что ответственность за разлив нефти должна носить как превентивный, так и «карательный» характер. Решение обозначенных выше проблем при применении норм уголовного, административного и трудового законодательства, позволит более эффективно бороться с проблемой загрязнения окружающей среды нефтепродуктами.

### **3. Гражданско–правовая ответственность при возмещении вреда, причиненного в результате разлива нефти**

Отношения, связанные с возмещением вреда, причиненного в результате экологического правонарушения, основываются на принципе гражданско-правовой ответственности. Данный принцип предусматривает обязанность причинившего вред возместить вред полностью независимо от того, был ли он привлечен к другому виду ответственности или нет.

В соответствии со ст. 69 ВК РФ лицо, причинившее вред водным объектам, возмещает его либо добровольно, либо в судебном порядке.

Наиболее сложным элементом процедуры компенсации является определение размера вреда, причиненного водному объекту в результате разлива нефтепродуктов с судна. Трудность состоит в том, что природные объекты не обладают заранее определенной денежной стоимостью. Поэтому для определения суммы компенсации причиненного вреда применяются специальные методики и таксы, либо производится сложение стоимости работ по восстановлению нарушенных свойств компонентов окружающей среды.

Размер вреда, причиненного в результате разлива нефтепродуктов на море с судов рассчитывается в соответствии с Методикой исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства, утвержденной приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 13 апреля 2009 года № 87 (далее – Методика) [26].

Основной проблемой возмещения вреда от разлива нефти на море является то обстоятельство, что механизм компенсации вреда, причиненного водным объектам, фактически заменен на исчисление размера причиненного вреда по Методике и взыскание данной суммы с причинителя вреда. Однако целевое расходование взысканной суммы на устранение причиненного разливом нефти вреда и восстановление конкретного водного объекта не гарантируется и действующим законодательством не предусмотрено (см. решение Арбитражного суда Приморского края от 24.10.2016 по делу № А51-18128/2016 о взыскании убытков, причиненных водному объекту в результате разлива нефтепродуктов с судна «Капитан Сергиевский»).

Некоторые трудности возникают при исчислении размера причиненного вреда, производимого с учетом факторов, влияющих на его величину. К таким

факторам относятся водохозяйственная ситуация и значимость состояния водных объектов, природно-климатические условия, интенсивность и длительность воздействия вредных веществ на водный объект (пункт 9 Методики). Так, при исчислении размера вреда, причиненного разливом нефтепродуктов при перекачке мазута в бункеровочно-зачистную станцию «ББС-5» в бухте Золотой Рог, Арбитражный суд признал неверными расчеты размера вреда, произведенные Тихоокеанским морским управлением Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (истец). По расчетам истца, ущерб составил 33 332 450 руб., по расчетам суда ущерб составил 9 677 385 руб. Не смотря на то, что суд и истец использовали при расчете одну и ту же Методику, размер ущерба в их расчетах различается более чем в 3 раза.

Для решения данной проблемы необходимо внести изменения в Методику задач которых будет являться разъяснение порядка определения времени начала ликвидации загрязнения и времени прекращения сброса вредных веществ, а также порядок доказывания данных обстоятельств в суде.

Следующая проблема заключается в том, что для компенсации вреда, причиненного аварийным загрязнением, используются государственные резервы, в то время, когда хозяйствующий субъект, по вине которого произошло загрязнение, не в состоянии компенсировать нанесенный им вред. Порядок выделения бюджетных средств из специального резервного фонда Правительства РФ по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и последствий стихийных бедствий определен Постановлением Правительства РФ от 15.02.2014 № 110 определен [27].

Однако в законодательстве отсутствует отлаженный механизм компенсации возвращения денежных средств, изъятых из резервного фонда по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций, для ликвидации последствий аварийного разлива нефти.

Решением проблемы расходования бюджетных средств на ликвидацию разливов нефти с судов может стать развитие механизма страхования гражданской ответственности за причинение вреда окружающей среде.

Катастрофа танкера «Волгонефть-139» в Керченском проливе 11.11.2007 выявила следующую проблему, так ущерб от аварии оказался намного больше страховой суммы, на которую была застрахована ответственность владельца танкера. Ответственность владельца танкера была застрахована на 5 миллионов долларов, а размер ущерба был оценен Южной транспортной прокуратурой в 30 миллиардов руб. (1,25 миллиарда долларов) [28].

Проблемой страхования гражданской ответственности за разлив нефти является несистемное изложение положений о страховании усложняет применение данных норм на практике. Отсутствие закрепленных законодательством норм об обязательном экологическом страховании или страховании ущерба от аварийных разливов нефти ставит под угрозу, как интересы общества, так и государства в целом в вопросах экологической безопасности территорий и акваторий от разливов нефтепродуктов с судов. [29].

Для решения данного вопроса, а также для реализации принципа «загрязнитель платит» необходимо развить институт «экологического страхования».

Из вышесказанного следует, что в российском законодательстве существуют некоторые проблемы с вопросом возмещением вреда, причиненного в результате разлива нефти и нефтепродуктов с судов:

1) существует ряд недостатков в методике исчисления размера вреда (недостаточна ясность формулировок, отсутствие порядка доказывания фактических обстоятельств, сведения о которых используются при исчислении размера вреда, проблема отнесения объема собранного при ликвидации загрязнения нефтепродукта к последствиям конкретно аварии и другие);

2) для компенсации вреда, причиненного аварийным разливом нефти используются государственные резервы, т.е. принцип «загрязнитель платит» не реализован;

3) не в полной мере реализован механизм целевого использования денежных средств, взысканных за причиненный водному объекту вред;

4) не все проблемы решены и в системе экологического страхования, что также делает механизм возмещения вреда менее эффективным.

#### Заключение

Повышенный интерес международного сообщества и представителей бизнеса к освоению **морских** пространств, как потенциальному источнику нефти и газа на долгие десятилетия

вперед, заставляет задуматься о перспективах **охраны** природной **среды** под воздействием таких видов деятельности как рыболовство, разведка, добыча и перевозка углеводородного сырья, интенсивное судоходство.

Международно-правовая охрана среды Мирового океана и его ресурсов нашла отражение в многочисленных соглашениях государств по предотвращению загрязнения моря нефтью и другими вредными веществами в результате судоходства, сброса отходов с судов и наземных источников, исследований и разработки ресурсов морского дна и его недр. Среди них - универсальные конвенции, действие которых распространяется на весь Мировой океан, и региональные - по охране отдельных его районов [30]. С целью обеспечения быстрого и адекватного возмещения всего ущерба, причиненного загрязнением морской среды, государства сотрудничают в осуществлении действующего международного права, касающегося ответственности, а также в разработке процедур выплаты надлежащего возмещения, таких как страхование ответственности или компенсационные фонды [31].

Приведенный в статье анализ позволил нам выделить специфические черты, а равно в ряде случаев указать на отсутствие специфики правового регулирования гражданско-правовой, уголовной и административной и дисциплинарной ответственности за загрязнение морской среды в Российской Федерации.

#### Литература

1. Иванов В. А., Показеев К. В., Шейдер А. А. Основы океанологии. – СПб. - М. - Краснодар: Лань, 2008. – 573 с.
2. Алешин И. В. Охрана окружающей среды при освоении ресурсов Мирового океана. – СПб.: СПбГМТУ, 2005. 88 с.
3. Бокрис О. М. Химия окружающей среды. – М.: Химия, 1982. – 670 с.
4. Куделькин Н. С. Юридическая ответственность за загрязнение морской среды: Автореф. дис. . кандидата юрид. наук. М., 2009. С. 5.
5. Бринчук М. М. Российское государство и охрана природы // Политика и общество. 2006. № 6. С. 20.
6. Загрязнение морской среды с судов [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://seaspirit.ru> (дата обращения: 07.07.2018).
7. Сибриков С. Г. Техногенные системы и экологический риск: Учеб. пособие. – Ярославль: Яросл. гос. ун–т им. П. Г. Демидова, –2009. – С. 59 – 61.
8. Конвенция Организации Объединенных Наций по морскому праву (Заключена в г. Монтего-Бее 10.12.1982) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://base.garant.ru> (дата обращения: 07.07.2018).
9. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 года (МАРПОЛ/MARPOL 73/78) (Заключена в Лондоне 02.11.1973) в редакции Протокола 1978 года (Подписан в г. Лондоне 17.02.1978) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://base.garant.ru> (дата обращения: 07.07.2018).
10. Яковлев А. В. Правовое регулирование предотвращения и возмещения экологического ущерба внутренних морей // Вестник РУДН. – 2013. – № 2. – С. 116 – 120.
11. Каменщиков Ф. А., Богомольный Е. А. Удаление нефтепродуктов с водной поверхности и грунта. – М.: Ин-т компьютер. исслед., Ижевск: R&C Dynamics, 2006. 525 с.
12. Конституция Российской Федерации (принята всенародным голосованием 12.12.1993) (с учетом поправок, внесенных Законами РФ о поправках к Конституции РФ от 30.12.2008 № 6–ФКЗ, от 30.12.2008 № 7–ФКЗ, от 05.02.2014 № 2–ФКЗ, от 21.07.2014 № 11–ФКЗ) // Собрании законодательства РФ, 04.08.2014, № 3, ст. 4398.
13. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7–ФЗ (ред. от 31.12.2017) «Об охране окружающей среды» // Российская газета: Специальный выпуск, 25.08.2002. № 3, ст. 133.
14. Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации от 30.04.1999 № 81–ФЗ (ред. от 29.12.2017) // Собрании законодательства РФ, 03.05.1999, № 18, ст. 2207.
15. Уголовный кодекс Российской Федерации от 13.06.1996 № 63–ФЗ (в ред. от 31.12.2017) // Собрание законодательства РФ, 17.06.1996, № 25, ст. 2954.
16. Уголовное право. Особенная часть: Учеб. для вузов / Грачева Ю. В., Есаков Г. А., Корнеева А. В. и др./ под ред. А. И. Чучаева. – М.: Проспект, 2015. – С. 257 – 258.

17. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях от 30.12.2001 № 195–ФЗ (ред. от 05.02.2018) // Собрание законодательства РФ, 07.01.2002, № 1 (ч. 1), ст. 1.
18. Постановление Правительства РФ от 04.11.2006 № 639 (ред. от 22.04.2009) «О порядке утверждения методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства» // Собрание законодательства РФ, 13.11.2006, № 46, ст. 4791.
19. Постановление Правительства РФ от 23.05.2000 № 395 «Об утверждении Устава о дисциплине работников морского транспорта» // Собрание законодательства РФ, 29.05.2000, № 22, ст. 2311.
20. Кожевников В. В., Коженевский В. Б., Рыбаков В. А. Теория государства и права: Учеб. для вузов. – М.: Проспект, 2063. – С. 120 – 122.
21. Кузнецова Н. Ф. Проблемы квалификации преступлений: Лекции по спецкурсу "Основы квалификации преступлений" / Под ред. В. Н. Кудрявцев. – М.: Городец, 2007 – С. 35 – 36.
22. Лопашенко Н. А. Экологические преступления: Комментарий к главе 26 УК РФ. – СПб.: Изд-во "Юридический центр Пресс", 2002. – С. 25 – 27.
23. Случевская Ю. А. Конкуренция норм гл. 26 УК РФ, связанных с загрязнением водных объектов. // Экологическое право. – 2013. – № 2. – С. 65 – 79.
24. Приказ Минтранса России от 02.07.2013 N 229 (ред. от 04.04.2017) "Об утверждении Обязательных постановлений в морском порту Владивосток" (Зарегистрировано в Минюсте России 22.07.2013 N 29114) // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти", № 37, 16.09.2013.
25. Оперативная информация по осмотру акватории бухты Золотой Рог. Официальный сайт Федеральной службы по надзору в сфере природопользования [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://tmu25.rpn.gov.ru/node/2625> (дата обращения: 07.07.2018).
26. Заключение по Методике исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://econadzor.com> (дата обращения: 07.07.2018).
27. Постановление Правительства РФ от 15.02.2014 № 110 (ред. от 30.09.2015) «О выделении бюджетных ассигнований из резервного фонда Правительства Российской Федерации по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и последствий стихийных бедствий» // Собрание законодательства РФ, 24.02.2014, № 8, ст. 809.
28. Мищенко В. Л. Предложения к концепции федерального закона «О защите морей российской федерации от нефтяного загрязнения» // Институт эколого-правовых проблем «Экоюрис». – 2014. – № 1. – С. 12 – 39.
29. Егорова Е. Н. Экономические инструменты защиты окружающей среды: страхование ответственности судовладельцев за разливы нефти // УЭС. – 2013. – № 12 (60). – С. 66 – 78.
30. Международно-правовая ответственность за загрязнение морской среды [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ronl.ru/diplomnyye-raboty/gosudarstvo-pravo/459274/>
31. Транспортное право. Особенная часть: Учебное пособие / С. В. Асеев. – Н. Новгород: Издательство ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2007. - 117 с.

#### References

1. Ivanov VA, Pokazeev KV, Shader AA Fundamentals of Oceanology. - St. Petersburg – Moscow - Krasnodar: Lan, 2008. - 573 p.
2. Aleshin IV. Environmental protection in the development of resources of the World Ocean. - SPb .: SPbGMTU, 2005. 88 pp.
3. Bokris, OM, Chemistry of the Environment. - Moscow: Chemistry, 1982. - 670 p.
4. Kudelkin NS Legal liability for pollution of the marine environment: Author's abstract. dis. . candidate jurid. sciences. M., 2009. S. 5.
5. Brinchuk MM Russian State and Nature Conservation H Politics and Society. 2006. № 6. P. 20.
6. Pollution of the marine environment from ships [Electronic resource] - Access mode: <http://seaspirit.ru> (reference date: 07.07.2018).
7. Sibrikov SG Technogenic systems and environmental risk: Textbook. allowance. - Yaroslavl: Yaroslavl. state. un-t them. PG Demidov, -2009. - P. 59 - 61.
8. United Nations Convention on the Law of the Sea (concluded in Montego Bay on 10.12.1982) [Electronic resource] - Access mode: <http://base.garant.ru> (reference date: 07.07.2018).
9. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 (MARPOL / MARPOL 73/78) (Concluded in London on 02.11.1973) as amended by the Protocol of 1978 (Signed in London on 17.02.1978) [Electronic resource] - Access mode: <http://base.garant.ru> (date of circulation: 07.07.2018).
10. Yakovlev AV Legal regulation of the prevention and compensation of ecological damage to internal seas // Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. - 2013. - No. 2. - P. 116 - 120.
11. Kamenshikov FA, Bogomolny EA Removal of oil products from the water surface and soil. - Moscow: Institute of computers. Issled., Izhevsk: R & C Dynamics, 2006. 525 p.
12. The Constitution of the Russian Federation (adopted by popular vote on 12.12.1993) (taking into account the amendments introduced by the Laws of the Russian Federation on Amendments to the Constitution of the Russian Federation No. 6-FKZ of December 30, 2008, No. 7-FKZ of December 30, 2008, No. 2-FKZ, dated 05.02.2014 - FKZ, from 11/21/2014 № 11-FKZ) // Collection of the legislation of the Russian Federation, August 4, 2014, No. 3, art. 4398.
13. Federal Law of 10.01.2002 No. 7-FZ (Ed. Of December 31, 2017) "On Environmental Protection" // Rossiyskaya Gazeta: Special Issue, August 25, 2002. № 3, art. 133.

14. Code of Merchant Shipping of the Russian Federation No. 81-FZ of April 30, 1999 (as amended on December 29, 2017) // Collection of Legislation of the Russian Federation, 03.05.1999, No. 18, art. 2207.
15. The Criminal Code of the Russian Federation of June 13, 1996, No. 63-FZ (as amended on December 31, 2017) // Collection of Legislation of the Russian Federation, June 17, 1996, No. 25, art. 2954.
16. Criminal law. Special part: Textbook. for higher education institutions / Gracheva Yu. V., Esakov GA, Korneeva AV et al. / ed. AI Chuchaeva. - Moscow: Prospect, 2015. - P. 257 - 258.
17. The Code of the Russian Federation on Administrative Offenses No. 195-FZ of December 30, 2001 (as amended on 05.02.2018) // Collection of Legislation of the Russian Federation, 07.01.2002, No. 1 (Part 1), art. 1.
18. Decree of the Government of the Russian Federation of 04.11.2006 No. 639 (as amended on April 22, 2009) "On the procedure for approving the methodology for calculating the amount of damage caused to water bodies as a result of violation of water legislation" // Collected Legislation of the Russian Federation, November 13, 2006, No. 46, art. . 4791.
19. Decree of the Government of the Russian Federation of 23.05.2000 No. 395 "On approval of the Charter on the discipline of maritime transport workers" // Collection of Legislation of the Russian Federation, 29.05.2000, No. 22, art. 2311.
20. Kozhevnikov VV, Kozhenevsky VB, Rybakov VA Theory of State and Law: Proc. for universities. - Moscow: Prospekt, 2063. - P. 120 - 122.
21. Kuznetsova NF Problems of qualification of crimes: Lectures on a special course "Fundamentals of the qualification of crimes" / Ed. V.N. Kudryavtsev. - Moscow: Gorodets, 2007 - pp. 35 - 36.
22. Lopashenko NA Ecological crimes: Commentary on chapter 26 of the Criminal Code of the Russian Federation. – Pb.: Publishing house "Legal Center Press", 2002. - P. 25 - 27.
23. Yu. A. Sluchevskaya. The competition of the norms of Ch. 26 of the Criminal Code of the Russian Federation related to the pollution of water bodies. // Ecological right. - 2013. - No. 2. - C. 65 - 79.
24. Operational information on the inspection of the water area of Golden Horn. Official site of the Federal Service for Supervision of Natural Resources [Electronic resource] - Access mode: <http://tmu25.rpn.gov.ru/node/2625> (reference date: 07.07.2018).
25. Semanov GN The concept of the federal law "On the prevention of marine pollution by oil" // USP. - 2008. - No. 1. - P. 13 - 49.
26. Conclusion on the methodology for calculating the amount of damage caused to water bodies due to violation of water legislation [Electronic resource] - Access mode: <http://econadzor.com> (reference date: 07.07.2018).
27. Decree of the Government of the Russian Federation of February 15, 2014 No. 110 (as amended on September 30, 2015) "On the allocation of budgetary allocations from the reserve fund of the Government of the Russian Federation for the prevention and liquidation of emergency situations and consequences of natural disasters" // Collection of Legislation of the Russian Federation, 24.02.2014, No. 8, art. 809.
28. Mishchenko VL Proposals to the concept of the federal law "On the Protection of the Seas of Russia
29. Egorova, E.N. Economic Instruments for Environmental Protection: Insurance of Liability of Ship Owners for Oil Spills, UEks. - 2013. - No. 12 (60). - P. 66 - 78.
30. International legal responsibility for pollution of the marine environment [Electronic resource] - Access mode: <https://www.ronl.ru/diplomnyye-raboty/gosudarstvo-pravo/459274/> (reference date: 07.07.2018).
31. Transport law. Special part: Textbook / SV Aseev. - N. Novgorod: Publisher FGOU VPO "VGAVT", 2007. – 117 p.

УДК 378.656.612

## ПРОБЛЕМЫ МОРСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ВУЗОВ НА КОМПЕТЕНТНОСТНЫЙ СТАНДАРТ ПОДГОТОВКИ МОРЯКОВ

**Михаил Анатольевич Москаленко**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Теории и устройства судна  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50 – а  
тел. +7(902) 4812121, e-mail: asmsh@rambler.ru

**Иван Борисович Друзь**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры Теоретической механики и сопротивления материалов  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а  
e-mail: druz\_i\_b@mail.ru

**Сергей Михайлович Затепакин**

Начальник научно-исследовательского отдела  
управления научно-исследовательской и инновационной деятельности  
Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского  
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50-а  
e-mail: s.zatepyakin@gmail.com

### Аннотация

С введением в практику обучения «Закона об образовании в РФ», модернизационные принципы «Болонского процесса», на законодательном уровне закрепили «компетентностный подход» подготовки в Вузах. Теперь, работодатель (рынок труда) стал диктовать свои требования к качеству подготовки специалистов по соответствующему профилю. Учитывая то обстоятельство, что рыночные отношения предполагают конкуренцию, Вузы для привлечения слушателей, начали разрабатывать новые учебные программы, где обучающийся наделяется расширенным спектром самых невероятных компетенций (от общекультурных, до компетенций в области космических технологий не связанных с конкретной специальностью и целями подготовки). В статье с методических позиций рассматриваются указанные проблемные аспекты, с точки зрения качества образования и подготовки моряков при внедрении в Вузах «компетентностного подхода» в образовательных программах, с учетом конвенционных требований. Образовательные системы формализованы и рассматриваются с использованием адекватных математических моделей.

**Ключевые слова:** компетенции, компетентность, эффективный контракт, система образования

## PROBLEMS OF MARITIME EDUCATION IN THE TRANSITION OF UNIVERSITIES IN TO COMPETENCE STANDART OF THE SEAFARERS TRAINING

**Mikhail A. Moskalenko**

Dr.Sci.Tech., professor  
Professor of Ship theory and structure department  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
tel. +7(902) 4812121, e-mail: asmsh@rambler.ru

**Ivan B. Druz**

Dr. Sci. Tech., professor  
Professor of department of Theoretical mechanics and strength of materials  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
e-mail: druz\_i\_b@mail.ru

**Sergey M. Zatepyakin**

Director of the Research Department  
of the Directorate of Research and Innovation Activity  
Maritime state university named Admiral G. Nevelskoi  
50 – a, Verkhneportovaya st., 690059, Vladivostok, Russia  
e-mail: s.zatepyakin@gmail.com

### Abstract

With the introduction of the "law on education in the Russian Federation", the modernization principles of the "Bolonia process", at the legislative level consolidated the "competence approach" of training in Universities. Now, the employer (labor market) began to dictate their requirements for the

quality of training in the relevant profile. Given the fact that market relations involve competition, Universities to attract students began to develop new curricula, where the student is endowed with an expanded range of the most incredible competencies (from General cultural, to competencies in the field of space technology not related to a specific specialty and training objectives). In the article from methodical positions the specified problem aspects, from the point of view of quality of education and training of seamen at introduction in higher education Institutions of "competence approach" in educational programs, taking into account Convention requirements are considered. Educational systems are formalized and considered using adequate mathematical models.

**Key words:** competence, effective contract, the system of education

**Введение**

Происходящие в Российской системе высшего образования перемены, в рамках модернизационной стратегии (которая пересматривает цели и задачи образования в целом) коснулись и системы морского образования. С введением закона «об образовании в РФ» №273-903 от 29.12.2012 модернизационные принципы приобрели четкую законодательную базу обязательную для исполнения всеми участниками образовательного процесса.

**1. Педагогические задачи обучения специалистов морских профессий**

Традиционные знаниево-объяснительные системы образования (так называемые немецкие системы – муштрования обучающихся) перестали удовлетворять потребности информационного общества XXI века, где информация полностью обновляется каждый пятилетний период. Прежние «зуновские» принципы образования (дающие знания, умения и навыки – (ЗУНЫ) без привязки к последующей деятельности обучающегося) обеспечивающие выпускников объемом ЗУНов на весь период их дальнейшей профессиональной деятельности [1], привели к росту дефицита квалифицированных кадров удовлетворяющих потребностям рынка.

Особенно остро дефицит кадров начал ощущаться в морской отрасли в последние 10 лет, что связано с развитием сложности логистики перевозок и увеличением размеров судов, при одновременном росте энерговооруженности и сложности оборудования. Последнее обстоятельство стимулировало резкий рост автоматизации на флоте с одновременным сокращением судовых экипажей и работников береговых подразделений судоходных компаний. В частности, с введением в практику «Международного кодекса по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращением загрязнения» (МКУБ), был полностью демонтирован складывавшийся десятилетиями институт наставничества в судоходных компаниях.

Введение в обязательный штат компаний должности, назначенное лицо, которое получило совсем другие функции и полномочия, и на сегодня, является по большей части «делопроизводителем» не поспевающим за развитием международного морского права (с ежемесячным введением новаций касающихся практики перевозок и безопасности мореплавания) еще больше, по нашему мнению, зарегулировало морскую отрасль и увеличило «бумажную нагрузку» на судовые экипажи. В этих условиях, известная парадигма «Мы приедем на флот и нас научат» перестала работать.

Ошибки экипажа (человеческий фактор) стали определяющими в причинах морских аварий, что

стимулировало идею создания автономных и полуавтономных судов.

Зуновская модель устойчиво работала, когда существовал определенный баланс, в фазовом образовательном пространстве, между передачей знаний преподавателем при норме функции подготовки и усвоением материала обучающимся, (см. рис. 1). Между педагогом и обучающимся прослеживалась устойчивая связь, необходимая для успешного завершения обучения в равновесной точке А лежащей выше линии «*min*» для аттестации». Иными словами, преподаватель для стимулирования освоения материала обучающимися занимался ничем иным, как «муштрой» пока не заставлял последних освоить ЗУНЫ на минимально допустимом уровне. Разумеется, после развала Советского Союза данная система начала давать сбой, что в первую очередь было связано с недофинансированием образования и снижением реальных зарплат в Вузах. Процесс обучения все больше и больше стал приобретать формализованный характер, а точка А, показанная на схематичном графике (Рис. 1) стала смещаться в сторону «неустойчивого равновесия», т. е. ниже линии «*min*» для аттестации. Результатом явилась подготовка Вузами в значительном количестве неквалифицированных кадров, мало пригодных к выполнению должностных обязанностей и повышению уровня профессио-нальной подготовки. Системный кризис в высшем образовании (особенно явно выраженный в системе заочного дистанционного образования) потребовал демонтажа Зуновских принципов обучения и перевода системы образования на новый уровень – «компетентного подхода», что нашло свое законодательное закрепление в (гл. 1, ст. 2) нового закона об «образовании в РФ».

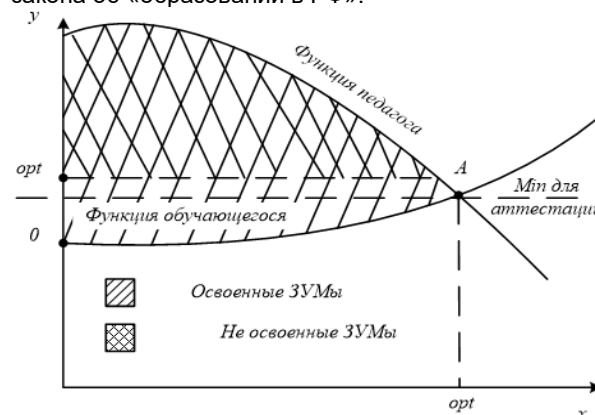


Рис. 1. Традиционная ЗУНовская система образования: 0 – точка подготовки обучающегося к освоению курса, x – усвоенные обучающими ЗУНЫ, y – ЗУНЫ передающиеся преподавателем, А – равновесная точка обучения

В европейском образовании переход на «компетентностный подход» произошел значительно раньше, с подписанием в 1988г. на праздновании 900 летия Болонского университета ректорами 80 университетов, так называемой «Великой хартии университетов» «Magna Charta Universitatum», что запустило самый крупномасштабный процесс в истории европейской образовательной системы, названный «Болонским процессом» [2].

В ходе «Болонского процесса» традиционная Зуновская модель была дополнена деятельным «компетентностным подходом» и образовательная модель получила название «компетентностной». В переводе с латинского «competentia» означает круг вопросов, где человек хорошо осведомлен, т. е. обладает познаниями и опытом. Компетенция выступает как необходимые для выполнения конкретной работы знания, умения и навыки [3]. Компетентность же, выступает как владение соответствующими компетенциями и способность выполнить конкретную (соответствующую целям обучения) работу на должном для практики уровне.

**2. Компетентностный подход в профессиональной подготовке кадров**

В рамках «компетентностного подхода» меняются задачи и мотивация образования.

Для достижения целей образования следует коренным образом изменить технологию образовательного процесса, прежде всего образовательные стандарты. Здесь, главным должно явиться изменение практической направленности образования для нужд рынка (производственного, судоходного и т. п.).

Учитывая то обстоятельство, что образовательные услуги сами по себе в современном обществе, являются «товаром», многие Вузы для лучшей реализации образовательных услуг начали включать в программы такое количество различных компетенций (не имеющих отношения к обучению для выполнения конкретной работы), что полезный смысл компетентностного подхода начинает терять свое предназначение, превращаясь в свою полную противоположность, как препятствие для обучения.

Морское образование в смысле «компетентностного подхода» находится в несколько лучшей ситуации, так как, подготовка моряков должна осуществляться в рамках международного права (превалирующего над национальным правом). С закреплением «компетентностного подхода» в новой редакции Международной конвенции «О подготовке и дипломировании моряков и несении вахты». ПДНВ – 78 с поправками 2010г. компетенции определены с позиций минимальных стандартов необходимых для выполнения конкретной работы по соответствующей должности, в составе экипажа морского судна.

Процесс получения необходимых документов для занятия соответствующей должности достаточно хорошо регламентирован и состоит из 3-х этапов. Это, подготовка моряка (наделение необходимыми компетенциями), проверка его компетентности (способности выполнять работу по должности) морской квалификационной комиссией (МКК) и дипломирование (т. е. документальное

подтверждение права на занятие соответствующей должности) [4].

В этой связи, надо понимать, что для целей ПДНВ 78 определены только минимально необходимые и достаточные компетенции, а каждая Администрация (государство флага) может организовать подготовку моряков по своим стандартам, но не ниже конвенционных. Разумеется, в морских Вузах стандарты образования должны быть выше, чем например, в морских колледжах, т. е. на перспективу занятия обучающимися руководящих должностей в составе экипажей морских судов и береговых подразделений. Отсюда, видно, что популистские требования морских профсоюзов (в частности РПСМ) «уравнять в правах на профессию» выпускников морских Вузов и колледжей, не соответствуют целям и задачам «компетентностного подхода» в морском образовании и подготовке моряков.

Что же собственно изменилось с введением «компетентностного подхода» в образовании? Казалось, уделяйте больше внимания практической направленности подготовки и цели обучения будут достигнуты? Для понимания произошедших изменений рассмотрим компетентностную модель на фазовом образовательном пространстве, показанном на схематичном графике (Рис. 2).

Данная система хорошо описывается уравнениями модели Ланкастера [5]. Для любой начальной точки фазовой плоскости с координатами (x, y) соответствующей, например, уровню начальной подготовки обучающегося, модель имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{x} = -by \\ \dot{y} = -ax \end{cases} \quad (1)$$

где a – это уровень восприятия материала обучающимся (например, желание и мотивация), b – это уровень преподавания в вузе (например, уровень компетентности педагогического состава и т. п.).

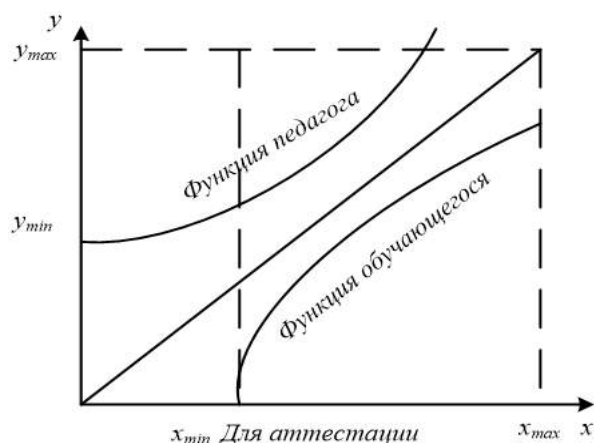


Рис. 2. «Жесткая» компетентностная модель системы образования: x – усвоенные обучающимися компетенции, y – компетенции передающиеся преподавателем



Точка над буквой означает производную по времени, т. е. скорость изменения величины.

Данная модель допускает точное решение:

$$\frac{dx}{dy} = \frac{by}{ax}, \quad ax^2 - by^2 = const. \quad (2)$$

Эволюция компетентностной модели на фазовом пространстве учебного процесса будет происходить вдоль гиперболы заданной уравнением (2) (см. рис. 2). Эти гиперболы разделены прямой  $\sqrt{ax} = \sqrt{by}$ . Если начальная точка с координатами  $(x, y)$ , соответствующая начальному уровню подготовки обучающегося, лежит выше этой прямой, то цели подготовки будут достигнуты и обучающиеся приобретают минимально необходимые компетенции (в противном случае, если начальная точка лежит ниже прямой, требуется пройти дополнительную подготовку необходимую для усвоения курса и повторное обучение).

При этом, как видно по характеру кривых, преподаватель не может влиять на ход учебного процесса (действительно, в морском образовании компетенции четко определены конвенционным образом).

Попробовав изменить коэффициенты  $a$  и  $b$  в системе (1) на функциональные зависимости,

$$b = f(x, y),$$

путем например, надбавок к зарплате преподавателя в соответствии с критериями эффективности, покупки литературы и лабораторного оборудования для обучающихся, мы получим систему уравнений которая уже не решается явно. Но, за счет структурной устойчивости модели (см. графики, Рис.3) можно утверждать, что при любых функциональных зависимостях для коэффициентов, топологический тип системы не изменится (кривые будут разделены уже не прямой, а некоторой кривой) и кривые будут все равно разделены нейтральной осью. Вывод очевиден (и он не радужный для целей образования): При «компетентностном подходе» повлиять на процесс улучшения обучения со стороны преподавателя, например, системой эффективных контрактов, нельзя в принципе учитывая предложенную образовательную модель.

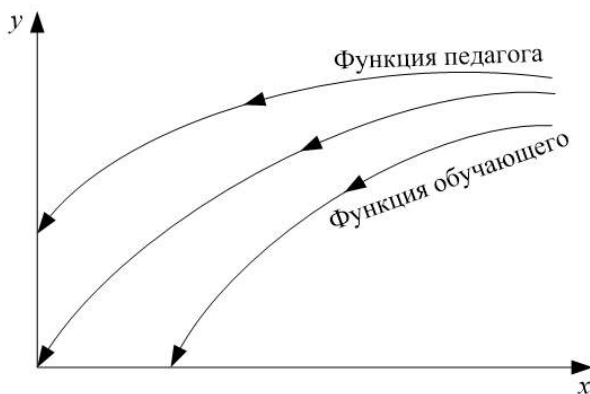


Рис. 3 «Мягкая» компетентностная модель системы образования

Это очень интересный вывод в свете внедрения в практику Вузов эффективных контрактов преподавателей, в соответствии с Распоряжением Правительства РФ от 30.04.2014 №722р «Об утверждении плана мероприятий («дорожной карты») «Изменения в отраслях социальной сферы, направленные на повышение эффективности образования и науки» [6].

Показательным в этом смысле является пример оспаривания положений эффективного контракта в судебном порядке.

Так, в Кировском районе суде г. Томска в ноябре 2015 года рассматривалось дело об оспаривании положений эффективного контракта. Е. обратился с иском в суд к Федеральному государственному автономному образовательному учреждению высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» ТПУ о признании приказа в части объявления замечания незаконным, снятии дисциплинарного взыскания, компенсации морального вреда.

Основанием подачи иска стало невыполнение Е. минимального набора критериев эффективности (выполнение в объеме менее 25 %), которые были внесены в дополнительное соглашение с работником. Критерии были следующие: количество публикаций; количество разработанных УМКД для новой дисциплины; поддержание в актуальном состоянии персональной страницы на русском и английском языках на сайте Вуза, количество размещенных научных статей сотрудника, руководство научно-исследовательской работой студентов, ставшими призерами олимпиад, научных конкурсов, стипендий и грантов, выставок, конференций российского и международного уровня; количество подтверждающих документов о получении дополнительного профессионального образования; участие в работе научной группы, проводящей исследования в рамках финансирования, полученного на конкурсной основе, из бюджетов всех уровней или российских научных фондов по тематике научно-образовательной деятельности преподавателя с объемом средств на каждого члена коллективно суммарно; участие в работе научной группы, проводящей исследования по программам, грантам, хоздоговорам или контрактам по тематике научно-образовательной деятельности преподавателя с участием студентов или аспирантов, объем средств на каждого студента и/или аспиранта. И, как следствие, наложение дисциплинарного взыскания работодателем.

Суд пришел к выводу, что многие из указанных критериев не зависят от воли преподавателя. Так, не зависит от воли работника время и количество публикаций статей в научных изданиях, от него зависит написание и сдача материала. Такой критерий, как руководство научно-исследовательской работой студентов, ставшими призерами олимпиад, научных конкурсов, стипендий и грантов, выставок, конференций российского и международного уровня предполагает не только руководство, но и желание студентов стать участниками и победителями олимпиад. Единого механизма, способного заставить студента участвовать – нет. Следовательно, если студенты

отказались участвовать в олимпиаде или не заняли призовые места, то данный критерий не зависит от воли преподавателя.

Критерий участия в работе научной группы, проводящей исследования по программам, грантам, хоздоговорам или контрактам по тематике научно – образовательной деятельности преподавателя с участием студентов или аспирантов, объем средств на каждого студента и/или аспиранта, не зависит от воли работника. Все договоры заключаются не с работниками, а с ТПУ. В том случае, если по специальности истца не заключили договор, то он не мог участвовать в научной группе проводящей исследования.

В соответствии с частью 1 статьи 192 Трудового кодекса РФ [7] наличие вины работника является обязательным условием для применения к нему дисциплинарного взыскания.

Совершение виновных действий Е., которые повлекли бы невыполнение критериев эффективности в судебном заседании не установлено [8].

Как видно из вышеописанного примера, полезные с точки зрения законодателя мероприятия на практике не способны улучшить качество обучения в Вузе, что подтверждается характером самой компетентностной модели образования, показанной на схематичном графике (Рис. 2). Очевидно, критерии эффективности нуждаются еще в научном обосновании и в этом вопросе должны быть четко регламентированы законодателем, а не устанавливаться локальными актами конкретного Вуза, имеющего полную свободу в установлении критериев и показателей не связанных с образовательным процессом, и не зависящих от воли работника, и его желания к труду [9].

### Заключение

1. Переход Вузов на «компетентностный подход» по существу кардинально не меняет цели и задачи морского образования и подготовки моряков,

учитывая конвенционные требования определенные в ПДНВ – 78.

2. Морское образование в Вузе по программам «специалист» наделяет обучающихся компетенциями «на перспективу», что отрицательно сказывается на общей цели обучения в рамках «компетентностного подхода».

Выходом из сложившейся ситуации могло бы стать внедрение в практику обучения 2-х ступенчатой системы образования (3 года бакалавр, + 2 года – магистр для занятия должностей старшего состава, как например, поступает в обучении моряков Администрация Испании).

3. Творческий потенциал преподавателя при «компетентностном подходе» в учебном процессе ограничен. Изменить его путем введения эффективного контракта объективно не представляется возможным (например, нельзя эффективным контрактом повлиять на цели и задачи конвенционной подготовки и обучения моряков). По нашему мнению, эффективную составляющую в контрактах надо ограничить в 10 % от оклада, а оклад поставить в зависимость от ученого звания, являющегося государственным признанием эффективности работы конкретного преподавателя за долгие годы его работы в Вузе.

4. Образовательные технологии в «компетентностном» подходе сильно унифицируются, цели и задачи образования значительно упрощаются увеличивая доступность высшего образования. При этом, молодежь начинает разочаровываться в эффективности такого образования для целей дальнейшего карьерного роста (рассматривая получение высшего образования в современных условиях как «инвестицию» для более эффективной продажи в дальнейшем своей компетентности на рынке труда, при отказе от работы на 4–5 лет, даже в случае получения для обучения бюджетного места).

### Литература

1. Вербицкий А.А. Личностный компетентностный подходы в образовании А. А. Вербицкий, О. Б. Ларионова – М. : Логос, 2009. – 336 с.
2. Болонский процесс: результаты обучения и компетентностный подход (книга и приложение 1) / под науч. Ред. В.И. Байденко. – М. : Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2009. – 536 с.
3. Лентарев А.А. Компетентностный подход в подготовке моряков / Проблемы транспорта Дальнего Востока. Сборник научных трудов. – Владивосток: ДВО ПАТ, 2017. – С. 163–165.
4. Письменный М.Н. Конвенционная подготовка судоводителей морских судов / М.Н. Письменный. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2009 – 254 с.
5. Арнольд В.И. «Жесткие» и «Мягкие» математические модели / В.И. Арнольд. – М.: МЦНМО, 2000 – 32 с.
6. Собрание законодательства РФ, 12.05.2014, № 19, 2469 с.
7. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 №197-903 (ред. от 03.07.2016) / Собрание законодательства РФ, 07.01.2002, № 1 (ч. 1), – С. 3.
8. Решение Кировского районного суда г. Томска от 25. ноября 2015 года по делу № 2 – 2798/15.
9. Танасейчук Я. В. Эффективный контракт в образовании (Текст) // Актуальные вопросы юридических наук : материалы III Междунар. научконф. (г. Чита, апрель 2017 г.). – Чита издательство Молодой ученый, 2017.– С. 111–114 URL [https:// moluch.ru/conf/law/](https://moluch.ru/conf/law/)

### References

1. Verbickii A. A. Lichnostniyi kompetentnostniyi podkhodiy v obrazovanii A. A. Verbickii, O. B. Larionova – M. : Logos, 2009. – 336 s.
2. Bolonskii process: rezultatiy obucheniiy i kompetentnostniyi podkhod (kniga i prilozhenie 1) / pod nauch. red. V. I. Baidenko. – M. : Issledovatel'skii centr problem kachestva podgotovki specialistov, 2009. – 536 s
3. Lentarev A. A. Kompetentnostniyi podkhod v podgotovke moriykov / Problemyi transporta Dalnego Vostoka. Sbornik nauchnykh trudov. – Vladivostok: DVO RAT, 2017. – S. 163–165.

- 
4. Pismennyii M. N. Konvencionnaia podgotovka sudovoditelei morskikh sudov / M. N. Pismennyii. – Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2009 – 254 s.
  5. Arnold V. I. «Zhestkie» i «Miygkie» matematicheskie modeli / V.I. Arnold. – M. : MCNMO, 2000 – 32 s.
  6. Собрание законодательства РФ, 12.05.2014, № 19, 2469 с.
  7. Trudovoi kodeks Rossiiskoi Federacii ot 30.12.2001 №197-903 (red. ot 03.07.2016) / Sobranie zakonodatelstva RF, 07.01.2002, № 1 (ch. 1), – S. 3.
  8. Reshenie Kirovskogo raionnogo syda g. Tomskа ot 25. noiabriy 2015 godа po delu № 2 – 2798/15.
  9. Tanaseichuk Ia. V. Effektivnyii kontrakt v obrazovanii (Tekst) // Aktualniye voprosiy uridicheskikh nauk : materialiy III Mejdunar. Nauch. konf. (g. Chita, aprel 2017 g.). – Chita izdatelstvo Molodoi ycheniyi, 2017. – S. 111–114 URL <https://moluch.ru/conf/law/>



## Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Электронное сетевое (ISSN 2588-0233) и печатное (ISSN № 2073-7173) издание  
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3  
**e-mail: mit-journal@mail.ru www.morintex.ru**

### ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов.

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте **www.morintex.ru**
3. Одна рецензия на публикуемую статью по соответствующей специальности с подписью, заверенной гербовой печатью. При междисциплинарном исследовании предоставляются две рецензии от экспертов различных областей наук по соответствующей тематике.
4. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
5. Лицензионный договор
6. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) могут быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу **mit-journal@mail.ru** (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

По желанию авторов, документ 1 в бумажной версии и компакт-диск с документами 2 и 3 могут быть либо присланы по почте в адрес редакции, либо доставлены непосредственно в редакцию, либо переданы одному из членов редколлегии.

**На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.**

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом может быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

**Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.**

**Стоимость публикации 9000 рублей по выставяемому по запросу счету.**

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

Главный редактор научного журнала  
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

**Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ****Гайкович А. И.****Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.**

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

**Архипов А. В., Рыбников Н. И.****Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.**

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

**Караев Р. Н., Разуваев В. Н., Фрумен А. И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.**

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

**Шауб П. А.****Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.**

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

**Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.**

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

**Гайкович А. И.****Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014**

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**