

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

ISSN 2073-7173 (print) 011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010010001010101  
ISSN 2588-0233 (on line) 1001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010  
10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110  
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100  
00110101001101001000010110100101010001001000011111100110011001101101011001110000001110010100101  
110111001100101011110010101001010011010011100010110010100110010101111001010111100101101001010  
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001  
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100  
00101001110011010011110001010010101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
**LIBRARY.RU**

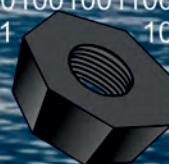
 **ВЫСШАЯ АТТЕСТАЦИОННАЯ  
КОМИССИЯ (ВАК)**  
при Министерстве образования и науки  
Российской Федерации



**№ 4 (46) Т.2 2019**



01000110110000011011011000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010  
1100101111000100110000110110111011010001001101001110010001010010101000110101110100001  
01010001101110100100010011101100001011001110101001110100110001010101101010010011001110  
110101100001010111010010100110110101100010110101011010010100111010101 101001  
100110100110111100110010001100010100111010010101100011010101110101101 1010  
0100011011000001101101100010100100111010011100110100111010101000010 011





# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)  
ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173

**Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление**

**О НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

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

Периодичность издания — 4 номера в год

**В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.**

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

Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru) из раздела «для авторов»

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) в открытом доступе.

Подписной индекс 99366 в объединенном каталоге «Пресса России».

Журнал распространяется посредством подписки в 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
05.13.18	Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ	Технические, Физико-математические

Рукописи представляются в редакцию в электронном виде (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 № ФС72-33245 от 19.09.2008.

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

Адрес: 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 [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)

ISSN 2073-7173, ISSN 2588-0233

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

## ABOUT SCIENTIFIC JOURNAL «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

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

**The journal 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.**

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

The journal 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.

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

Journal headings:

- 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.

### Publication frequency — 4 issues per year

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

Manuscripts are to be submitted to the editorial office in electronic form (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 № ФС72-33245 of 19.09.2008

**Address:** Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190121, 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



# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 Т.2 2019 [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)  
Сквозной номер 46

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

## Главный редактор:

Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

## Редакционная коллегия

### Заместители главного редактора

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

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

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

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

### Члены Редакколлегии

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

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

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

Ф.Ф. Легуша, д.ф.-м.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

## Редакционный Совет

### Сопредседатели

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

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

### Члены Совета

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

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

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

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

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

С.А. Огай, д.т.н., Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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

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



# MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 4 V.2 2019 [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)

ISSN 2073-7173, ISSN 2588-0233

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

## Chief Editor

**N.V. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Professor**

## Editorial Staff

### Deputy Chief Editors

A.I. Gaykovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia  
D.A. Skorokhodov, Doctor of Engineering, Professor, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia

A. I. Frumen, PhD, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia  
P. A. Shaub, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Institute of Shipbuilding and armaments of Russian Navy, St. Petersburg, Russia

### Members of Editorial Staff

A.V. Alekseev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia  
R. V Borisov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia  
Yu.A. Vlasov, Cand. Sci. (Phys & Math), Adjunct Professor, Florida International University, Miami, FL, USA

M.V. Voyloshnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Maritime state university named Admiral Nevelskoi, Vladivostok, Russia

A.N. Dyadik, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia  
V. A. Evteev Dr. Sci. (Eng.), United Shipbuilding Corporation, St. Petersburg, Russia

F.F. Legusha, Dr. Sci. (Phys. & Math.), professor, State marine technical university of Saint-Petersburg, St. Petersburg, Russia

Yu. I. Nechayev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia  
V. V. Rodionov, Cand. Sci. (Eng), Senior Research Scientist, CJSC "Sea Project", St. Petersburg, Russia

V.Yu. Semenova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia  
N. A. Taranukha, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

## Editorial Board

### Co-chairmen

I.G. Zakharov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-CEO ZMKB "Almaz", St. Petersburg, Russia

G.A. Turichin, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

### Council Members

E.M. Appolonov, Dr. Sci. (Eng.), General Director, Lazurit Central Design Bureau JSC, Nizhny Novgorod, Russia

A.I. Gajkovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, CEO, Research Centre "Marine Intelligent Technologies", St. Petersburg, Russia

I.G. Malygin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, CEO, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia

G.N. Muru, Cand. Sci. (Eng), Executive Director, 51 CCIS, St. Petersburg, Russia

D.V. Nikushchenko, Dr. Sci. (Eng.), Vice-Rector for Research, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

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

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

V.N. Polovinkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Assistant Director General, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

K.V. Rozhdestvenskij, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector for International Science & Education, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

S.P. Stoljarov, Cand. Sci. (Eng), Professor, Dean of the Faculty of naval power and automation, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia



# 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	стр
<b>ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА</b>	
<b>Лебедев А.О., Лебедева М.П., Хомяков А.А.</b> Общий подход к расчету параметров движения подводного аппарата.....	10
<b>Молоков К.А., Новиков В.В., Антоненко С.В., Суров О.Э., Китаев М.В.</b> Основы прогнозирования технического состояния, работоспособности и долговечности сварных конструкций.....	18
<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ</b>	
<b>Костылев К.А., Городецкий Д.О.</b> Прогнозирование временных рядов в задаче моделирования взаимодействия льда и судна, движущегося в ледовых условиях.....	28
<b>Ратников А.А., Нагаева М.В., Карпачев А.А., Осуховский В.Э., Гончарук В.К.</b> Особенности изготовления прочных корпусов подводных аппаратов на основе металлогластокомпозита для их использования на различных глубинах мирового океана.....	33
<b>Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Турусов С.Н., Фёдоров А.В.</b> Принципы формирования противоаварийных алгоритмов амфибийных судов на воздушной подушке.....	39
<b>ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА</b>	
<b>Лелюхин В.Е., Колесникова О.В., Антоненкова Т.В., Дренин А.С., Кузьминова Т.А.</b> Геометрия неидеальных объектов при конструировании и производстве морской техники.....	46
<b>Хуснуллина А.Р., Нифонтов Ю.А.</b> Возможные способы предупреждения миграции нефтяных загрязнений в морские акватории при эксплуатации портовых сооружений.....	53
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)</b>	
<b>Гужвенко И.Н., Перекрестов А.П., Чанчиков В.А., Прямухина Н.В., Павлов А.В.</b> Повышение износостойкости узлов и деталей судовых ДВС путем модифицирования применяемых смазочных материалов.....	59
<b>ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ</b>	
<b>Фахми Ш.С., Селиверстов С.А., Вислогузов В.В., Крымский В.В.</b> Метод пороговой сегментации изображений морских судов.....	69
<b>УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ</b>	
<b>Домнина О.Л., Пластинин А.Е., Батанина Е.А., Наумов В.С.</b> Оценка риска возникновения транспортных происшествий на реках в границах республики Татарстан.....	79
<b>Решняк В.И., Захаров В.Н., Мизгирев Д.С., Слюсарев А.С.</b> Оценка экологических рисков при аварийных разливах нефти на объектах водного транспорта.....	85
<b>Фахми Ш.С., Железнов М.М., Турусов С.Н.</b> Метод и алгоритмы триангуляционного кодирования и декодирования изображений морских сюжетов.....	91
<b>Лукомская О.Ю., Комашинский В.И., Таранцев А.А., Таранцев Ан.А.</b> Описание движения транспортных объектов в модели «интеллектуальная жидкость» (на английском языке).....	100
<b>Краснодубец Л.А., Конева С.А., Цалоев В.М., Пронина А.К.</b> Проектирование электропривода на основе синхронных машин с постоянными магнитами и адаптивных ПИД регуляторов.....	108
<b>Данилов А.В.</b> Метод «конечного поворота и смещения» для решения обратной задачи кинематики для манипуляторов с последовательно соединенными звеньями.....	114
<b>Горгуца Ю.В.</b> Практическое применение математических критериев принятия решений в задачах морских портов.....	120
<b>Горгуца Ю.В.</b> Метод комплексной оценки сравнительной эффективности вариантов компоновки морских портов с помощью анализа иерархий. Практическое применение.....	125
<b>Титов А.В., Баракат Л.А., Павлов А.В., Чанчиков В.А.</b> Создание беспилотной зоны е-навигации на примере акватории северного Каспия и подходах к морскому торговому порту «Оля».....	130

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И  
ПРОИЗВОДСТВАМИ**

<b>Бычков В.Я., Грошева Л.С., Плющаев В.И.</b> Динамика судна с колесным движительно-рулевым комплексом в условиях внешних воздействий.....	139
<b>Лисиенко С.В., Вальков В.Е., Иванко Н.С., Бойцов А.Н.</b> Разработка математической модели и оптимизационной задачи по организации и управлению промысловым флотом при ведении добычи водных биологических ресурсов на примере промысла дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии в Дальневосточном рыбохозяйственном бассейне.....	147

**УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

<b>Решняк В.И., Домнина О.Л., Пластинин А.Е., Отделкин Н.С.</b> Экологическое обеспечение водного туризма.....	154
<b>Журавлева Н.А., Шавшуков В.М.</b> Анализ рынка цифровых инвестиций и оценка перспектив их использования в развитии морских интеллектуальных технологий.....	161
<b>Решняк В.И., Пластинин А.Е., Наумов В.И., Слюсарев А.С.</b> Применение озона в процессах очистки нефтесодержащей льяльной (подсланевой) воды.....	168
<b>Домнина О.Л., Цверов В.В., Лисин А.А., Чувилина О.В.</b> Прогноз развития цифровых технологий в транспортной логистике (на английском языке).....	173

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

<b>Хабаров С.П., Шпекторов А.Г.</b> Проектирование и исследование распределенных судовых систем управления техническими средствами в среде SimInTech.....	181
---	-----

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ**

<b>Волхонская Е.В., Коротей Е.В.</b> Разработка математической модели поля излучения двухзеркальной антенны Грегори в рамках метода поверхностных токов.....	188
<b>Липатов И.В., Ситнов А.Н., Решняк В.И., Слюсарев А.С.</b> Совершенствование методологии исследования гидродинамических процессов в камере судоходного шлюза для обеспечения ускоренного и безопасного судопропуска.....	194
<b>Липатов И.В., Отделкин Н.С., Слюсарев А.С., Чичкин О.И.</b> Совершенствование гасительных элементов судоходных шлюзов ВДСКа на базе численного моделирования.....	202
<b>Карпачёв А.А., Гренков Ю.А., Буравлёв В.Н.</b> Точный расчёт параметров цилиндрической оболочки.....	208
<b>Василенко А.М., Пятакович Н.В., Пурденко А.П., Филиппова А.В., Филиппов Е.Г.</b> Система расчета пространственной структуры и параметров гидроакустического поля.....	213
<b>Коршунов В.А., Мудрик Р.С., Пономарев Д.А., Родионов А.А.</b> Численное моделирование ледового сопротивления судна с использованием методологии сцепляющих элементов.....	225



CONTENTS	page
<b>THEORY OF SHIP AND STRUCTURES</b>	
<b>Aleksei O. Lebedev, Marina P. Lebedeva, Al'bert A. Khomyakov</b> General approach to calculating the motion parameters of the underwater vehicle.....	10
<b>Konstantin A. Molokov, Valery V. Novikov, Sergey V. Antonenko, Oleg E. Surov, Maxim V. Kitaev</b> Outlines of forecasting technical conditions, workability and durability of welded structures.....	18
<b>SHIP DESIGNING AND STRUCTURE</b>	
<b>Konstantin A. Kostylev, Dmitry O. Gorodetsky</b> Forecasting time series in the problem of modeling interaction of ice and a vessel, moving in ice conditions.....	28
<b>Aleksandr A. Ratnikov, Marina V. Nagaeva, Aleksandr A. Karpachev, Valery E. Osuhovsky, Vladimir K. Goncharuk</b> Features of the manufacture of durable underwater hulls based on metal-glass composite for their use at various depths of the oceans.....	33
<b>Valery YU. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov, Sergey N. Turusov, Alexandr V. Fedorov</b> Principles of formation of anti-accident algorithms of amphibious hovercrafts.....	39
<b>SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION</b>	
<b>Vladimir E. Lelyukhin, Olga V. Kolesnikova, Tatyana V. Antonenkova, Artyom S. Drenin, Tatyana A. Kuzminova</b> Geometry of non-ideal objects in the design and manufacture of marine facilities	46
<b>Aliya R. Khusnullina, Yuri A. Nifontov</b> Possible ways to prevent oil pollution migration to sea water area during exploitation port facilities.....	53
<b>SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)</b>	
<b>Ivan N. Guzhvenko, Arshavir P. Perekrestov, Vasiliy A. Chanchikov, Nina V. Pryamukhina, Akim V. Pavlov</b> An increasing of the wear resistance of some parts of shipboard internal combustion engines by modification of applied lubricants.....	59
<b>INFORMATION SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL SYSTEM ANALYSIS</b>	
<b>Shakeeb S. Fahmi, Svyatoslav A. Seliverstov, Victor V. Visloguzov, Vitalii V. Krymskii</b> The threshold segmentation method of sea ships images.....	69
<b>CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION</b>	
<b>Olga L. Domnina, Andrey E. Plastinin, Ekaterina A. Batanina, Viktor S. Naumov</b> Risk assessment of transport accidents on rivers in the borders of the republic of Tatarstan.....	79
<b>Valery I. Reshnyak, Vasily N. Zakharov, Dmitriy S. Mizgiriyov, Anatoliy.S. Slyusarev</b> The ecological risk assessment during accidental oil spills at water transport objects.....	85
<b>Shaheeb S. Fahmi, Maksim M. Zheleznov, Sergey N. Turusov</b> The marine images coding and decoding method and algorithms.....	91
<b>Olga Yu. Lukomskaya, Vladimir I. Komashinskiy, Aleksandr A. Tarantsev, Andrey A. Tarantsev</b> The description of the transport objects movement via "intellectual liquid" model (In English).....	100
<b>Leonid A. Krasnodubets, Svetlana A. Koneva, Vladimir M. Tsalojev, Anna K. Pronina</b> Designing of electric drive based on permanent magnet synchronous machines with adaptive PID controllers.....	108
<b>Alexander V. Danilov</b> "Finite Rotation and Displacement Method" for Solving Inverse Kinematics for Robot Manipulators with Series-Connected Links.....	114
<b>Yuliy V. Gorgutsa</b> Practical use mathematical criteria of decision-making in sea ports problems.....	120
<b>Yuliy V. Gorgutsa</b> Method of complex evaluation of comparative efficiency of layout options of sea ports through hierarchy analysis. Practical use.....	125
<b>Alexey V. Titov, Lama A. Barakat., Akim V. Pavlov, Vasiliy A. Chanchikov</b> Setting up of an unmanned e-Navigation zone on the example of the northern Caspian sea water area and approaches to the commercial sea port "Olya".....	130

**AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS**

**Vladislav Y. Bychkov, Lyudmila S. Grosheva, Valeriy I. Pluyshchaev** Dynamics of vessel with wheel propulsion steering system under external conditions..... 139

**Svetlana V. Lisenko, Vladimir E. Valkov, Nina S. Ivanko, Anatoly N. Boytsov** Development of a mathematical model and optimization problem for the organization and management of fishing fleet during production of water biological resources on the example of fisheries case Far Eastern sardine (Iwasi) and mackerel in the Far Eastern fisheries basin..... 147

**CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS**

**Valery I. Reshnyak, Olga L. Domnina, Andrey E. Plastinin, Nikolai St. Otdelkin** Ecological support of water tourism..... 154

**Natalia A. Zhuravleva, Vyacheslav M. Shavshukov** The analysis of digital investment market and assessment of prospects for their use in the development of marine intelligent technologies..... 161

**Valery I. Reshnyak, Andrey E. Plastinin, Viktor S. Naumov, Anatoliy S. Slyusarev** The application of ozone in the processes of oil-containing bilge water purification..... 168

**Olga L. Domnina, Vladimir V. Tserov, Alexander A. Lisin, Olesya V. Chuvilina** Forecast of digital technologies development in transport logistics (in English)..... 173

**COMPLEXES AND COMPUTER NETWORKS**

**Sergei P. Khabarov, Andrei G. Shpektorov** Distributed integrated marine automation systems design and research in Simin Tech environment..... 181

**MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS**

**Elena V. Volkhonskaya, Evgeniy V. Korotey** Mathematical model of the Gregory two-mirror antenna radiation field development within the surface current method..... 188

**Igor V. Lipatov, Alexander N. Sitnov, Dmitriy Valeriy I. Reshnyak , Anatoliy S. Slyusarev** Improving of the study methodology of hydrodynamic processes in the shipping lock chamber to ensure accelerated and safe navigation..... 194

**Igor V. Lipatov, Nikolai S. Otdelkin, Anatoliy S. Slyusarev, Oleg I. Chichkin** Improvement of damping elements of Volga-Don shipping locks on numerical simulation base..... 202

**Aleksandr A. Karpachev, Yury A. Grenkov, Vladislav N. Buravlev** The precise calculation of cylindrical shell parameters..... 208

**Anna M. Vasilenko, Natalia V. Pyatakovich, Alexander P. Purdenko, Alina V. Filippova, Evgenii G. Filippov** System for calculation of the spatial structure and parameters of a hydroacoustic field..... 213

**Vladimir A. Korshunov, Roman S. Mudrik, Dmitry A. Ponomarev, Alexander A. Rodionov** Numerical modeling of the ice resistance of a ship with cohesive elements methodology..... 225

## ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 629.12: 656.62: 621.396

### ОБЩИЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА

**Алексей Олегович Лебедев**

научный сотрудник лаборатории «Мореходных качеств судов»  
Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова  
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: LebedevaMP@gumrf.ru

**Марина Петровна Лебедева**

кандидат технических наук, заведующая лабораторией «Мореходных качеств судов»  
Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова  
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: LebedevaMP@gumrf.ru

**Альберт Александрович Хомяков**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник УНЦ МКС  
Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова  
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: LebedevaMP@gumrf.ru

#### Аннотация

В настоящее время существует множество подводных объектов настолько различающихся по внешнему виду и принципам перемещения, что они с трудом поддаются классификации. При этом отсутствует единая методика расчета параметров движения подводного объекта, что в недалеком будущем может оказаться сдерживающим фактором развития робототехники. Для построения удобного математического аппарата, позволяющего прогнозировать параметры движения подводных устройств возможно использовать наработки теории корабля, успешно применяющиеся для этой цели уже более 100 лет, с учетом специфики подводного объекта. В настоящей статье рассматривается метод математического описания параметров движения на примере движения легкого маневренного необитаемого подводного аппарата (ПНПА), способного позиционироваться в заданной точке и двигаться прямолинейно. Для этой цели используется две системы уравнений, связанные значениями начальных условий и условиями на границе между областями. Указанный подход позволяет избежать бесконечных значений параметров на границах областей и обеспечить непрерывность решений при переходе из одной области в другую. Проверка метода проводилась на примере расчета параметров движения подводного аппарата, корпус которого выполнен в виде эллипсоида вращения. Корпус аппарата легко описывается аналитически, что повышает точность расчетов.

**Ключевые слова:** подводный аппарат, математическая модель, движительно – рулевой комплекс, гидродинамические характеристики.

### GENERAL APPROACH TO CALCULATING THE MOTION PARAMETERS OF THE UNDERWATER VEHICLE

**Aleksei O. Lebedev**

researcher at the laboratory "Seaworthiness of ships"  
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg 198035, Russian Federation  
e-mail: LebedevaMP@gumrf.ru

**Marina P. Lebedeva**

PhD, head of the laboratory "Seaworthiness of ships"  
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg 198035, Russian Federation  
e-mail: LebedevaMP@gumrf.ru

**Al'bert A. Khomyakov**

PhD, Senior Researcher,  
head of the training and scientific center for seaworthiness of ships  
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
Dvinskaya, 5/7, St. Petersburg 198035, Russian Federation  
e-mail: LebedevaMP@gumrf.ru

#### Abstract

Currently, there are many underwater objects that are so different in appearance and principles of movement that they are difficult to classify. However, there is no unified methodology for calculating the motion parameters of an underwater object, which in the near future may turn out to be a deterrent

to the development of robotics. To build a convenient mathematical apparatus that allows predicting the motion parameters of underwater devices, it is possible to use materials of the ship's theory, successfully used for this purpose for more than 100 years, taking into account the specifics of the underwater object. A method of mathematical description of motion parameters using the example of the movement of a lightweight maneuverable uninhabited underwater vehicle, capable to position at a given point and move in a straight line, is discussed in the paper. For this purpose, two systems of equations, related by the values of the initial conditions and the conditions on the boundary between the regions, are used. The indicated approach allows one to avoid infinite parameter values at the boundaries of regions and to ensure continuity of solutions during the transition from one region to another. The method is tested using the example of calculating the motion parameters of the underwater vehicle, the body of which is designed as a spheroid. The apparatus body is easily described analytically, which increases the accuracy of calculations.

**Key words:** underwater vehicle, mathematical model, propulsion-steering unit, hydrodynamic characteristics.

### Введение

В настоящее время появилось множество подводных объектов настолько различающихся по внешнему виду и принципам перемещения [1], [2], что они с трудом поддаются классификации. При этом отсутствует единая методика расчета параметров движения, что в недалеком будущем может оказаться тормозом в развитии робототехники.

Было бы несправедливым утверждать, что расчетные оценки параметров движения отсутствуют вообще. Материалы, содержащие описание математических моделей движения аппаратов, начали появляться в открытой печати 10 – 15 лет назад.

Среди опубликованных материалов можно выделить статьи, посвященные общей постановке задачи [3] - [5], сводящейся к описанию структуры уравнений и содержащие лишь перечень сил и моментов, необходимых для расчета. Существуют работы, посвященные проблемам автоматического управления аппаратами [6] - [8], основывающиеся на упрощенном математическом описании параметров движения.

Учитывая, что определяющим при расчете управляемости являются значения гидродинамических характеристик корпуса, пытаются использовать метод идентификации [9] - [10]. В основу метода положен физический эксперимент по определению параметров движения аппарата в бассейне при выполнении серии маневров, сравнение полученных данных с результатами расчетов и корректировкой структурных формул до совпадения с данными эксперимента.

Известны попытки оценки гидродинамических характеристик аппаратов без проведения экспериментальных исследований [11]. Однако эти результаты применимы лишь в диапазоне пологих циркуляций при малых углах дрейфа.

Для построения удобного математического аппарата для прогнозирования параметров движения подводных устройств можно использовать наработки теории управляемости, успешно применяющиеся для этой цели уже более 100 лет, с учетом специфики подводного объекта.

Основой математической модели любого объекта служит система 6 нелинейных дифференциальных уравнений, применимых и для ПНПА. При решении этой системы уравнений возникает необходимость одновременно

удовлетворять граничным условиям при движении прямым курсом и при вращении на месте, что для одной системы уравнений невозможно без введения искусственных ограничений. С этой проблемой хорошо знакомы специалисты, разрабатывающие математические модели для тренажеров водоизмещающих судов.

Согласно положениям Теоретической механики [12] параметры движения тел могут рассчитываться либо с применением аппарата материальной точки, либо с применением аппарата однородного тела. Оба подхода имеют ряд ограничений, не позволяющих рассматривать задачу во всей области задания аргументов.

В первом случае с уменьшением радиуса вращения центробежная сила увеличивается, достигая бесконечных значений при вращении на месте. Одновременно момент инерции уменьшается от бесконечно большого значения до нуля.

Во втором случае аппарат представляется однородным телом, движущимся под действием системы сил, но центр поворота будет расположен внутри этого тела. В такой постановке, объект сложной формы разбивается на ряд простых форм и такие величины как центробежная сила, и момент инерции рассчитываются как интегральная сумма отдельных составляющих тел. Поэтому и центробежная сила и момент инерции принимают конечные значения. Однако этот метод неприменим, когда ось вращения оказывается вне пределов тела.

Предлагаемый в работе метод использует одновременно оба варианта решения, рассматривая движение подводного аппарата как материальную точку при больших радиусах кривизны траектории (задача 1), и как однородное тело при предельно малых радиусах кривизны (задача 2). Границей между областями служит контур тела.

### 1. Уравнения движения аппарата в горизонтальной плоскости

Для определенности используем при расчетах подводный аппарат, корпус которого выполнен в виде эллипсоида вращения [13]. Такой аппарат имеет аналитическое описание формы обводов, что уменьшает погрешность при выполнении численного интегрирования. Кроме того, при движении в горизонтальной плоскости

гидродинамические силы и моменты не зависят от угла разворота ПНПА.

Для движения и управления аппаратом используются два гребных винта, установленных в плоскости наибольшей ширины симметрично относительно диаметральной плоскости (рис. 1). Управление аппаратом, с таким движительным комплексом будет осуществляться путем изменения частоты вращения гребных винтов, упор которых пропорционален квадрату частоты вращения.

Рассмотрим задачу о горизонтальном движении аппарата отдельно в области большой кривизны, когда центр вращения расположен вне его контура (задача 1), и в области малой кривизны, когда центр вращения расположен внутри его контура (задача 2).

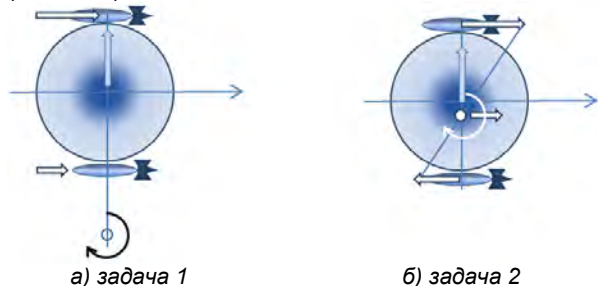


Рис. 1 Схема действия сил на аппарат при различных положениях центра вращения

Уравнения движения аппарата составляются в связанной с аппаратом системе координат и сохраняются одинаковыми не зависимо от типа решаемой задачи. Система уравнений имеет обычный вид [14], [15].

$$\frac{dV_x}{dt} \cdot M \cdot (1 + k_{11}) = (F_{p1} + F_{p2}) - F_{hd}, \quad (1)$$

$$\frac{dV_y}{dt} \cdot M \cdot (1 + k_{22}) = F_{cb} - F_{hd} \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} \cdot I_z \cdot (1 + k_{66}) = [F_{p1}R_d - F_{p2}R_d] - M_{hd} \quad (3)$$

где  $V_{x0}$ ,  $V_{y0}$ ,  $\omega_z$  - составляющие линейной скорости и угловая скорость вращения при центре тяжести,  $M$ - масса аппарата,  $k_{11}$ ,  $k_{22}$ ,  $k_{66}$  - присоединенные массы жидкости [16],  $F_{p1}$  и  $F_{p2}$  - упоры гребных винтов. Перечисленные величины одинаковы для обеих задач. Составляющие сил и моментов:  $F_{hd}$ ,  $M_{hd}$  - гидродинамическая сила и гидродинамический момент на корпусе,  $F_{cb}$  - центробежная сила,  $I_z$  - момент инерции аппарата различны для разных расчетных схем.

Использованная система координат, приведена на рис.2. Начало системы координат совмещено с его центром тяжести. Ось  $x$  располагается посередине между движителями в направлении действия упоров гребных винтов. Ось  $y$  перпендикулярна оси  $x$  и направлена вправо, если смотреть на аппарат сверху. Ось  $z$  направлена вниз. Положительными считаются силы, действующие в направлении осей и моменты, разворачивающие аппарат по часовой стрелке, если смотреть на палубу сверху.

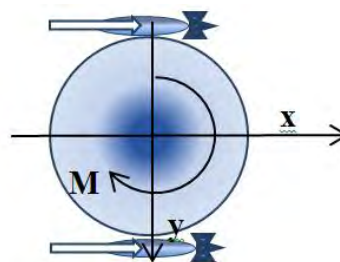


Рис. 2 Система координат

Создаваемый гребными винтами упор определяется по известным методикам [17-19]. Выражения имеют вид

$$F_{p1} = k_1 (J_{p1}) \cdot \rho n_1^2 D_p^4 \quad (4)$$

$$F_{p2} = k_1 (J_{p2}) \cdot \rho n_2^2 D_p^4 \quad (5)$$

где  $k_1 (J_{p1})$  - безразмерный упор гребного винта,  $n_{1,2}$  - частота вращения гребного винта,  $D_p$  - диаметр гребного винта,  $J_{p1}$  - поступь гребного винта.

При работе гребных винтов «враздрай» (задача 2) необходимо учитывать дополнительно боковую составляющую гидродинамической силы на гребных винтах [20].

Гребные винты, установленные на аппарате, используются и как средство движения аппаратом и как средство управления им. Положение центра вращения в начальный момент движения будет определяться соотношением упоров гребных винтов. При работе обоих гребных винтов на передний ход с одинаковой частотой центр вращения располагается на бесконечности. При работе гребных винтов на передний ход, но с разной частотой вращения центр поворота будет приближаться к аппарату, оставаясь при этом за пределами корпуса (рис.1а). При остановке одного из гребных винтов центр вращения будет расположен на корпусе аппарата.

При работе одного из гребных винтов на задний ход, центр поворота будет располагаться внутри корпуса аппарата (рис.1б). При равных по величине и противоположных по знаку упорах гребных винтов аппарат будет вращаться относительно главной оси.

Связь между упорами гребных винтов и начальным положением центра вращения можно определить формулой

$$R = \frac{(F_{p1} - F_{p2}) \cdot 0.5D}{F_{p1} + F_{p2}} \quad (6)$$

где  $D$  - диаметр аппарата,  $R$  радиус вращения.

При этом в точке расположения оси вращения появится сила, равная разности упоров гребных винтов.

При обращении в ноль упора  $F_2$  радиус вращения  $R$  будет равен половине диаметра. Окружность радиуса  $R$  будем считать границей между областями.

Системы уравнений вида (1) – (3), записанные для разных областей, будут различаться структурными формулами, определяющими

компоненты сил и моментов. Описание структурных формул приведено ниже.

**2. Структурные формулы для расчета сил и моментов. Задача 1 (область 1)**

Для расчета параметров движения методом материальной точки используются следующие выражения

*Вычисление центробежной силы.* Центробежная сила считается приложенной в центре тяжести и рассчитывается по формуле

$$F_{cb} = \frac{MV^2}{R} \quad (7)$$

где  $M$  - масса аппарата,  $V$  - скорость перемещения центра тяжести,  $R$  - радиус кривизны траектории движения.

*Вычисление момента инерции.* Момент инерции рассчитывается относительно оси, проходящей через центр инерции тела. Такое представление допустимо, поскольку метод материальной точки предполагает малые значения угловых скоростей по сравнению с линейными скоростями. Расчет момента инерции выполняется методом интегрального исчисления [10]. Формула для расчета имеет вид  $I_{z0} = \rho \iiint z(x)r_i^2 dx dy dz$ , где  $r_i$  - расстояние от центра тяжести элементарной массы до оси вращения.

*Вычисление гидродинамических характеристик.* Гидродинамические силы и моменты, действующие на корпус, определяются распределением давления по корпусу и приводятся к центру тяжести. При движении в горизонтальной плоскости гидродинамические характеристики аппарата, выполненного в виде тела вращения, будут зависеть только от относительной кривизны траектории. Безразмерная боковая сила на корпусе рассматриваемого аппарата положительна и увеличивается с ростом кривизны траектории по квадратичному закону. Гидродинамический момент отрицателен и также увеличивается по модулю с ростом кривизны траектории. Формулы для определения безразмерных гидродинамических характеристик приведены ниже

$$C_f = \frac{F(\bar{\omega})}{0.5\rho(V_0 \cdot \bar{V}_x)^2 \cdot A} = \frac{a_1 \cdot \bar{\omega} + a_2 \cdot \bar{\omega}^2}{0.5\rho(V_0 \cdot \bar{V}_x)^2 \cdot A} \quad (8)$$

$$C_{mz} = \frac{M_z(\bar{\omega})}{0.5\rho(V_0 \cdot \bar{V}_x)^2 \cdot A \cdot D} = \frac{b_1 \cdot \bar{\omega} + b_2 \cdot \bar{\omega}^2}{0.5\rho(V_0 \cdot \bar{V}_x)^2 \cdot A \cdot D} \quad (9)$$

где  $F(\bar{\omega})$ ,  $M_z(\bar{\omega})$  - гидродинамическая сила и момент на корпусе аппарата,  $a_{1,2}$ ,  $b_{1,2}$  - гидродинамические коэффициенты,  $V_0$  - скорость в начале маневра,  $\bar{V}_x$  - изменение скорости при маневре,  $A$  - характерная площадь,  $D$  - диаметр аппарата.

$$F_{cby} = \int_0^\pi dF_{cbi} d\chi = \rho \frac{2}{3} \omega_z^2 \int_0^\pi (S_{1i} x_{1i}^2 \cdot \cos(\chi) + S_{2i} x_{2i}^2 \cdot \cos(\chi + \pi)) \cdot d\chi \quad (12)$$

**3. Структурные формулы для расчета сил и моментов. Задача 2 (область 2)**

При уменьшении радиуса кривизны траектории до нуля кривизна бесконечно растет и использовать ее в качестве параметра становится невозможно. Поэтому в качестве параметра при расчетах движения однородного тела нужно использовать радиус вращения, или относительный радиус вращения. Формула (7), используемая ранее при расчете центробежной силы становится неприменимой. Для приближенного вычисления центробежной силы вращающееся тело представляется в виде системы элементарных тел массой  $d(m)$ , каждое из которых испытывает действие элементарной центробежной силы  $dF_{cb}$ .

*Вычисление центробежной силы.* Для вычисления центробежной силы объем тела разбивается плоскостями, проходящими через мгновенную ось вращения, на  $n$  элементарных масс (рис. 3). Положение каждой элементарной массы определяется положением оси вращения и углом  $\chi$  между вспомогательной плоскостью и осью  $y$ .

Масса элементарного тела, заключенного между двумя соседними плоскостями, может быть рассчитана по формуле

$$dm_i = \rho \cdot 0.5 S_i x_i d\chi \quad (10)$$

где  $d\chi$  - угол между плоскостями,  $x_i$  - расстояние от оси вращения до контура тела,  $S_i$  - площадь сечения вдоль оси вращения.

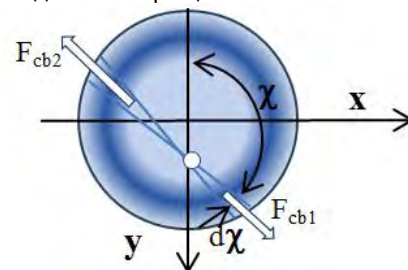


Рис. 3 Схема для расчета центробежной силы

Величина центробежной силы определится формулой

$$dF_{cbi} = dm_i \cdot \omega_z^2 R_i \quad (11)$$

где  $\omega_z$  - угловая скорость вращения аппарата,  $R_i$  радиус вращения центра тяжести каждой элементарной массы.

Легко видеть, что каждой элементарной массе  $dm_{1i}$ , расположенной справа от оси вращения, соответствует масса  $dm_{2i}$ , расположенная слева от оси вращения. Центробежные силы, действующие на эти элементы, лежат на одной прямой, и направлены в разные стороны.

Проецируя силы  $dF_{cbi}$  на оси координат, связанные с аппаратом, и суммируя их получим для каждого положения оси вращения

$$F_{cbx} = \int_0^{\pi} dF_{cbi} d\chi = \rho \frac{2}{3} \omega_z^2 \int_0^{\pi} (S_{1i} x_{1i}^2 \cdot \sin(\chi) + S_{2i} x_{2i}^2 \cdot \sin(\chi + \pi)) \cdot d\chi = 0 \quad (13)$$

При вращении аппарата относительно оси, проходящей через центр тяжести, все элементарные силы оказываются равными по величине, а интегральная сила обращается в ноль.

Функция  $\bar{F}_{cb} = -2.87 \cdot \bar{R}^3 + 0.71 \cdot \bar{R}^2 + 2.71 \cdot \bar{R}$ , описывающая зависимость значения центробежной силы от радиуса вращения аппарата, определена путем аппроксимации результатов расчета, проведенных для различных положений оси вращения.

**Вычисление момента инерции.** Момент инерции вращающегося тела относительно оси, не совпадающей с осью тела вращения, рассчитывается путем суммирования элементарных моментов инерции, каждый из которых определяется формулой

$$dl_z = dm_i \cdot r^2 \quad (14)$$

где  $r$  - расстояние от центра масс элементарного тела до оси вращения.

$$I_z = \int_0^{\pi} (dl_{z1} + dl_{z2}) d\chi \quad (15)$$

Функция

$$I_z = -71.5 \cdot \bar{R}^3 + 101.1 \cdot \bar{R}^2 - 3.55 \cdot \bar{R} + 8.39,$$

описывающая зависимость значения центробежной силы от радиуса вращения аппарата, также определена путем аппроксимации результатов расчета.

**Вычисление гидродинамических характеристик.** При определении гидродинамической силы на корпусе ПНПА необходимо учитывать, что безразмерная гидродинамическая сила должна уменьшаться от значения на границе до нуля при радиусе кривизны траектории, равном нулю. Структурную формулу для ее расчета можно принять в виде

$$C_f = \frac{F(\bar{R})}{0.5\rho(\omega_{z0} \cdot \bar{\omega}_z)^2 \cdot D^2 \cdot A} = \frac{a_1 \bar{R}^2 + a_2 \bar{R}}{0.5\rho(\omega_{z0} \cdot \bar{\omega}_z)^2 \cdot D^2 \cdot A} \quad (16)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  - гидродинамические коэффициенты,  $F(\bar{R})$  - гидродинамическая сила на корпусе аппарата,  $\omega_{z0}$  - угловая скорость в начале маневра,  $\bar{\omega}_z$  - изменение угловой скорости при маневре,  $A$  - характерная площадь,  $D$  - диаметр аппарата.

Величина гидродинамического момента на корпусе аппарата, выполненном в виде эллипсоида вращения, была измерена экспериментально в опытовом бассейне Университета. Как показали измерения, при значениях угловой скорости меньше 0,5 рад/с гидродинамический момент перестает зависеть от положения оси вращения и составляет

$$C_{mz} = \frac{M_z 8}{0.5\rho(\omega_{z0} \cdot \bar{\omega}_z)^2 \cdot D^5 \cdot \pi} = 0.058 \quad (17)$$

где  $M_z$  - гидродинамический момент на корпусе аппарата.

#### 4. Соответствие начальных условий рассматриваемых задач и условий на границе

Решение системы дифференциальных уравнений требует определения начальных условий движения. Для движения в пределах области 1 таким условием является значение скорости движения в начале маневра  $V_0$ . Для движения в пределах области 2 в качестве начального условия можно принять угловую скорость вращения относительно центральной оси аппарата  $\omega_{z0}$ .

Величина  $V_0$  определится из условия равенством суммарного упора гребных винтов и сопротивления корпуса. Угловая скорость вращения  $\omega_{z0}$  определится суммарным разворачивающим моментом гребных винтов, работающих «враздрай», и гидродинамическим моментом на корпусе. Эти величины связаны между собой. Рассчитать соответствие начальных условий можно, используя следующую систему уравнений

$$C_x \cdot 0.5\rho V_0^2 A_D - 2k_1(J_p) \rho n_p^2 \cdot D_p^4 = 0 \quad (18)$$

$$C_m \cdot 0.5\rho \omega_{z0}^2 (0.5D)^2 D_A D - 2k_1(J_p) \rho n_p^2 \cdot D_p^5 = 0 \quad (19)$$

где  $V_0$  - скорость движения аппарата прямым курсом в начале маневра,  $\omega_{z0}$  - максимально возможная угловая скорость вращения аппарата, соответствующая скорости  $V_0$ ,  $D$  - диаметр аппарата,  $D_p$  - диаметр гребного винта,  $k_1(J_p)$  - коэффициент упора гребного винта,  $n_p$  - частота вращения гребного винта,  $J_p$  - поступь гребного винта.

При сохранении неизменной частоты вращения гребного винта  $n_p$  и скорости потока в месте расположения гребного винта  $V_0$ , можно определить соотношение между скоростью прямолинейного движения и угловой скоростью вращения.

$$\omega_{z0} = \frac{V_0}{0.5D} \sqrt{\frac{C_x \cdot D_p}{C_m \cdot D}} \quad (20)$$

Таким образом, максимально возможное значение угловой скорости вращения аппарата будет пропорционально отношению диаметра винта и диаметра аппарата и гидродинамическими характеристиками аппарата.

Используя значения скоростей в начале маневра, можно определить мгновенную скорость как

$$V_x = V_0 \cdot \bar{V} \quad (21)$$

$$\omega_z = \omega_{z0} \cdot \bar{\omega} \quad (22)$$

где  $\bar{V}$  и  $\bar{\omega}$  - традиционно используемое в расчетах понятие - падение скорости.

Для обеспечения непрерывности решения необходимо, чтобы при переходе через границу функции, используемые при расчете, оставались непрерывными. К таким величинам относятся: центробежная сила, момент инерции, гидродинамическая сила, гидродинамический момент. Структурные формулы для силы на гребных винтах сохраняются неизменными как при решении уравнений в области 1, так и в области 2.

Условием непрерывности будет равенство соответствующих размерных величин при подходе к границе справа и слева, то есть

- для центробежной силы -  $F_{cb1}|_{\bar{\omega}=2} = F_{cb2}|_{\bar{R}=0.5}$
- для момента инерции -  $I_{z1}|_{\bar{\omega}=2} = I_{z2}|_{\bar{R}=0.5}$
- для гидродинамической силы -  $F_{hd1}|_{\bar{\omega}=2} = F_{hd2}|_{\bar{R}=0.5}$
- для гидродинамического момента -  $M_{hd1}|_{\bar{\omega}=2} = M_{hd2}|_{\bar{R}=0.5}$

Картина изменения функций при переходе через границу приведена на рис. 4 – 7. Относительный радиус кривизны траектории, соответствующий границе области равен 0,5. Расчеты выполнены для аппарата, имеющего корпус в виде эллипсоида вращения диаметром 0,9 м и высотой 0,45 м. Начальная скорость хода аппарата принималась равной 1 м/с.

Данные показаны для различных значений относительного радиуса вращения аппарата. Красными точками отмечены значения, соответствующие области 2, синими точками отмечены значения, соответствующие области 1.

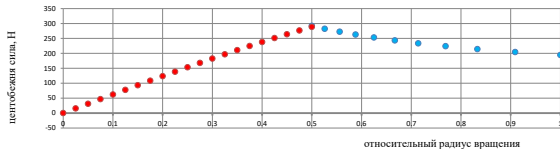


Рис. 4 Изменение центробежной силы при переходе границы областей

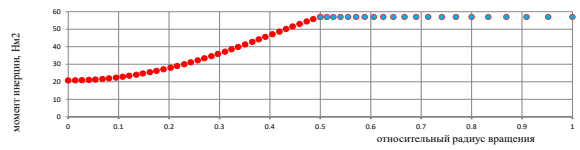


Рис. 5 Изменение момента инерции при переходе границы областей

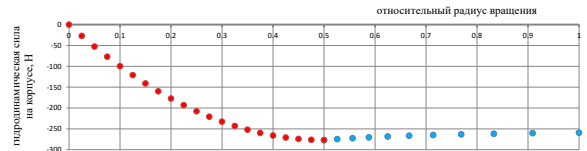


Рис. 6 Изменение гидродинамической силы при переходе границы областей

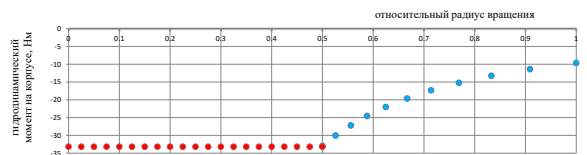


Рис. 7 Изменение гидродинамического момента при переходе границы областей

Далее, подготовленные таким образом величины должны приводиться к безразмерному виду, который будет разным для различных областей.

### 5. Безразмерный вид дифференциальных уравнений движения

С учетом введенных выше обозначений можно преобразовать уравнения движения к безразмерному виду. Причем для задач 1 и 2 вид преобразованных уравнений будет разным.

*Система уравнений для области 1.*

$$\frac{d\bar{V}_x}{d\tau} = \frac{3 \cdot \bar{V}^2}{4 \cdot \bar{h} \cdot (1 + k_{11})} \left[ \frac{8D_p^2}{\pi D^2} \left( \frac{k_1(J_{p1})}{J_{p1}} + \frac{k_1(J_{p2})}{J_{p2}} \right) - C_f(\bar{\omega}) \cdot \cos \beta \right] \quad (23)$$

$$\frac{d\bar{V}_y}{d\tau} = \frac{3 \cdot \bar{V}^2}{4 \cdot \bar{h} \cdot (1 + k_{22})} \left[ \frac{4}{3} \cdot \bar{h} \cdot \bar{\omega} - C_f(\bar{\omega}) \cdot \sin \beta \right] \quad (24)$$

$$\frac{d\bar{\omega}_z}{d\tau} = \frac{\rho \cdot \bar{V}^2 \cdot \pi D^5}{8 \cdot I_z \cdot (1 + k_{66})} \left[ \frac{4D_p^2}{\pi D} \left( \frac{k_1(J_{p1})}{J_{p1}} - \frac{k_1(J_{p2})}{J_{p2}} \right) - C_m(\bar{\omega}) \right] \quad (25)$$

*Система уравнений для области 2.*

Если представить угловую скорость вращения как произведение начальной скорости вращения и ее изменения в процессе маневра, то есть

$$\frac{d\hat{V}_x}{d\tau} = \frac{3 \cdot \hat{\omega}_z^2}{4 \cdot (1 + k_{11}) \bar{h}} \left[ \frac{k_1(J_{p1})}{J_{p1}} - \frac{k_1(J_{p2})}{J_{p2}} \right] \frac{8D_p^2}{\pi D^2} - C_f(\bar{R}) \cdot \cos \beta \quad (26)$$

$$\frac{d\hat{V}_y}{d\tau} = \frac{3 \cdot \hat{\omega}_z^2}{4 \cdot (1 + k_{22}) \cdot \bar{h}} \left[ \frac{32F_{cb}(\bar{R})}{\rho \cdot \pi D^4} - C_f(\bar{R}) \cdot \sin \beta \right] \quad (27)$$

$\omega_z = \omega_{z0} \cdot \bar{\omega}_z$ , то значение характерной скорости можно определить как величину линейной скорости на границе аппарата, то есть



$$\frac{d\bar{\omega}}{d\tau} = \frac{\rho \cdot \bar{\omega}_z^2 \cdot \pi D^5}{16 \cdot I_z \cdot (1 + k_{66})} \left[ \frac{8D_p^2}{\pi D^2} \left( \frac{k_1(J_{p1})}{J_{p1}} (1 + \bar{R}) + \frac{k_1(J_{p2})}{J_{p2}} (1 - \bar{R}) \right) - C_m \right] \quad (28)$$

### Заключение

В процессе выполнения работы по исследованию движения необитаемого подводного аппарата (ПНПА) была создана методика расчета, которую можно применять для аппаратов любой конструкции и для любых параметров движения от движения прямым курсом до вращения на месте.

Согласно этому методу, вместо используемого в теории управляемости метода материальной точки, не позволяющего рассматривать движение

на предельно малых радиусах кривизны траектории, было предложено разделить область решения на две области: область, где применим аппарат материальной точки (область 1) и область, где применим аппарат движения однородного тела (область 2). Границей между областями служит контур аппарата.

Области решений связаны между собой соотношениями начальных условий и условием непрерывности всех функций при переходе через границу.

### Благодарности

При финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, соглашение № 14.613.21.0085 от 12 февраля 2018 года. Уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI61318X0085.

### Литература

1. Технический отчет ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». Исследование и разработка необитаемого подводного аппарата для наблюдений и исследований морского дна. — Рег. № АААА-А18\_118120790057-3. — СПб., 2018.
2. Войтов Д. В. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты. — М.: Изд. Моркнига, 2012. — 500 с.
3. Yang Y., Liu Y., Wang Y., Zhang H., Zhang L. Dynamic modeling and motion control strategy for deep-sea hybrid-driven underwater gliders considering hull deformation and seawater density variation // *Ocean Engineering*. — 2017. — Vol. 143. — Pp. 66–78. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.07.047
4. Ridaou P., Carreras M., Ribas D., Sanz P. J., Oliver G. Intervention AUVs: the next challenge // *IFAC Proceedings Volumes*. — 2014. — Vol. 47. — Is. 3. — Pp. 12146–12159. DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.02819
5. Yu P., Wang T., Zhou H., Shen C. Dynamic modeling and three-dimensional motion simulation of a disk type underwater glider // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. — 2018. — Vol. 10. — Is. 3. — Pp. 318–328. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2017.08.002
6. Hegrehaes O., Hallingstad O., Jalving B. Comparison of mathematical models for the HUGIN 4500 AUV based on experimental data // *2007 Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*. — IEEE, 2007. — Pp. 558–567. DOI: 10.1109/UT.2007.370776
7. Лямина Е.А., Егоров С.А. Особенности построения системы управления угловой ориентацией подводного аппарата для больших углов наклона // *Инженерный журнал: наука и инновации*. — 2018. — № 3 (75). — С. 6. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-3-1745
8. Грумондз В.Т., Пильгунов Р.В., Виноградов М.В. Динамика продольного движения подводного буксируемого аппарата в задаче мониторинга заданной области континентального шельфа // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение*. — 2017. — № 6 (117). — С. 19–34. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-6-19-34
9. Bevilacqua L., Kleczka W., Kreuzer E. On the mathematical modeling of ROV's // *Robot Control 1991*. — Pergamon, 1992. — Pp. 51–54. DOI: 10.1016/B978-0-08-041276-4.50014-5
10. Aras M.S.M., Abdullah S.S., Rashid M.Z.A., Rahman A.A., Aziz M.A.A. Development and modeling of unmanned underwater remotely operated vehicle using system identification for depth control // *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*. — 2013. — Vol. 56. — No.1. — Pp. 136–145.
11. Mišković N., Vukić Z., Barišić M. Identification of underwater vehicles for the purpose of autopilot tuning // *Underwater vehicles*. — 2009. — Pp. 327–346.
12. Никущенко Д.В., Надымов Е.Н., Шушков Р.А. Расчет гидродинамических характеристик подводных аппаратов с выступающими частями, рулями и стабилизаторами // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. — 2010. — № 4. — С. 63–73.
13. Lebedeva M.P., Lebedev A.O., Butsanets A.A. Justification for the body construction selection of the unmanned uninhabited underwater apparatus // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2018. — Vol. 12. — No. 4. — Pp. 693–697. DOI 10.12716/1001.12.04.07
14. Лойцанский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики. — М.: Гос. Издательство Техничко-теоретической литературы, 1955. — Т. 2. Динамика. — 719 с.
15. Справочник по теории корабля. — Л.: Изд. Судостроение, 1985. — Т. 1–3.
16. Гофман Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник. Л.: Изд. Судостроение, 1988. — 360 с.
17. Короткин А.И. Присоединенные массы судна. Справочник. Л.: Изд. Судостроение, 1986. — 312 с.
18. Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А. Судовые движители. Л.: Изд. Судостроение, 1988. — 296 с.
19. Басин А.М., Миниович И.Я. Теория и расчет гребных винтов. — Л.: Изд. Судпромгиз, 1963. — 760 с.
20. Лебедева М.П., Вишневский Л.И. Силы на гребном винте маневрирующего судна // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 554–564. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-554-564

## References

1. *Tekhnicheskii otchet FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova». Issledovanie i razrabotka neobitaemogo podvodnogo apparata dlya nablyudeniy i ossledovaniy morskogo dna*. Reg. № AAAA-A18\_118120790057-3. SPb., 2018.
2. Voytov D.V. *Teleupravlyaemye neobitaemye podvodnye apparaty*. M.: Izd. Morkniga, 2012. 500 p.
3. Yang, Y., Liu, Y., Wang, Y., Zhang, H., & Zhang, L. (2017). Dynamic modeling and motion control strategy for deep-sea hybrid-driven underwater gliders considering hull deformation and seawater density variation. *Ocean Engineering*, 143, 66-78. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.07.047
4. Ridaou, P., Carreras, M., Ribas, D., Sanz, P. J., & Oliver, G. (2014). Intervention AUVs: the next challenge. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 12146-12159. DOI: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.02819
5. Yu, P., Wang, T., Zhou, H., & Shen, C. (2018). Dynamic modeling and three-dimensional motion simulation of a disk type underwater glider. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 10(3), 318-328. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2017.08.002
6. Hegrehaes, O., Hallingstad, O., & Jalving, B. (2007, April). Comparison of mathematical models for the HUGIN 4500 AUV based on experimental data. In *2007 Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies* (pp. 558-567). IEEE. DOI: 10.1109/UT.2007.370776
7. Lyamina, E.A., & Egorov, S.A. (2018). Special Aspects of ROV Attitude Control Systems for Large Pitch and Roll Angle Maneuvers. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 3(75), 6. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-3-1745
8. Grumondz, V.T., Pilgunov, R.V., & Vinogradov, M.V. (2017). Longitudinal Dynamics of Underwater Towed Equipment in the Problem of Monitoring the Defined Region of the Continental Shelf. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 6(117), 19-34. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-6-19-34
9. Bevilacqua, L., Kleczka, W., & Kreuzer, E. (1992). On the mathematical modeling of ROV's. In *Robot Control 1991* (pp. 51-54). Pergamon. DOI: 10.1016/B978-0-08-041276-4.50014-5
10. Aras, M.S.M., Rashid, M.Z.A., Abdullah, S.S., Rahman, A.A., & Aziz, M.A.A. (2013). Development and modeling of unmanned underwater remotely operated vehicle using system identification for depth control. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 56(1), 136-145.
11. Mišković, N., Vukić, Z., & Barišić, M. (2009). Identification of underwater vehicles for the purpose of autopilot tuning. *Underwater vehicles*, 327-346.
12. Nikushchenko, D.V., Nadyomov, E.N., & Shushkov, R.A. (2010). An algorithm for numerical simulation of underwater vehicles with prominent parts, rudders and stabilizers. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied mathematics. Computer science. Control processes*, 4, 63-73.
13. Lebedeva, M. P., Lebedev, A. O., & Butsanets, A. A. (2018). Justification for the body construction selection of the unmanned uninhabited underwater apparatus. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 12(4), 693-697. DOI 10.12716/1001.12.04.07.
14. Loytsanskiy, L.G., & Lur'e, A.I. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki*. Vol. 2. Dinamika. Moscow, Gos. Izdatel'stvo Tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1955. 719 p.
15. *Spravochnik po teorii korablya*. Vol. 1–3. Leningrad, Izd. Sudostroenie, 1985.
16. Gofman, D. *Dvizhitel'no-rulevoy kompleks i manevrirovaniye sudna*. *Spravochnik*. Leningrad, Izd. Sudostroenie, 1988. 360 p.
17. Korotkin, A.I. *Prisoedinennyye massy sudna*. *Spravochnik*. Leningrad, Izd. Sudostroenie, 1986. 312 p.
18. Artyushkov, L.S., Achkinadze, A.Sh., & Rusetskiy, A.A. *Sudovyye dvizhiteli*. Leningrad, Izd. Sudostroenie, 1988. 296 p.
19. Basin, A.M., & Miniovich, I.Ya. *Teoriya i raschet grebnykh vintov*. Leningrad, Izd. Sudpromgiz, 1963. 760 p.
20. Lebedeva, M.P., & Vishnevskii, L.I. (2019). Forces on the manoeuvring ship propeller. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 11(3), 554-564. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-554-564

УДК 621.791:624.042.12

## ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ, РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Константин Александрович Молоков**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры сварочного производства  
Дальневосточный федеральный университет  
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8  
e-mail: spektrum011277@gmail.com

**Валерий Васильевич Новиков**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры кораблестроения и океанотехники  
Дальневосточный федеральный университет  
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8  
e-mail: leka1551@rambler.ru

**Сергей Владимирович Антоненко**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры кораблестроения и океанотехники  
Дальневосточный федеральный университет  
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8  
e-mail: sergey.antonenko.43@mail.ru

**Олег Эдуардович Суров**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры кораблестроения и океанотехники  
Дальневосточный федеральный университет  
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8  
e-mail: surov-oe@rambler.ru

**Максим Владимирович Китаев**

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой кораблестроения и океанотехники  
Дальневосточный федеральный университет  
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8  
e-mail: maxkit@mail.ru

### Аннотация

В кораблестроении для многих сооружений важной является возможность оценки технического состояния морской техники, прогнозирования работоспособности и допустимого срока эксплуатации. На ресурс судовых конструкций оказывают большое влияние степень износа связей корпуса, остаточные деформации, трещины и другие микро- и макродефекты. В процессе эксплуатации судно испытывает циклические нагрузки, которые совместно с коррозионным износом и другими факторами способствуют накоплению усталостных микротрещин. Характеристику усталостной долговечности конструкций определяет деградация корпусной стали вследствие развития её структурной поврежденности, которая в условиях малоциклового усталости приводит к образованию опасных трещин. Поэтому оценка прочности и прогнозирования должны осуществляться с учетом истории развития трещин. В исследованиях отечественных ученых предлагаются диагностические и аналитические методы расчета усталостной прочности и остаточного ресурса сварных конструкций и их соединений. Например, для оценки и прогнозирования остаточного ресурса корпуса используются значения предела усталости корпусной стали, определенные на основании величин измеренной металлографическим методом длины структурного повреждения металла. Однако для осуществления корректной оценки усталостной прочности и работоспособности стальных конструкций и их сварных соединений возникает необходимость проведения исследования взаимосвязи между размерами дефектов (усталостных трещин) сталей, параметрами циклических нагружений и продолжительностями стадий разрушения. Кроме того, для создания моделей развития трещин необходимо выяснять значения скоростей их развития в предпороговой области кинетической диаграммы усталостного разрушения.

В данной работе приводятся схема снижения работоспособности, типичные усталостные повреждения, структурная поврежденность стальных судовых конструкций; предложены математические модели и метод расчетной оценки ресурса материала по данным структурно-механических характеристик. Решена задача построения кинетических диаграмм усталостного разрушения феррито-перлитных сталей для их первого и второго участков в общей связи. Представлена концепция развития инженерных методов оценки надежности материалов и сварных стальных конструкций при циклических нагрузках.

**Ключевые слова:** усталостная долговечность, структурная поврежденность, циклические

нагрузки, ресурс конструкции, микротрещина, математическая модель.

## OUTLINES OF FORECASTING TECHNICAL CONDITION, WORKABILITY AND DURABILITY OF WELDED STRUCTURES

**Konstantin A. Molokov**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of the Department of Welding Engineering  
Far Eastern Federal University  
690950, Vladivostok, st. Sukhanov, 8  
e-mail: spektrum011277@gmail.com

**Valery V. Novikov**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Shipbuilding and Ocean Engineering  
Far Eastern Federal University 690950,  
Vladivostok, ul. Sukhanov, 8  
E-mail: leka1551@rambler.ru

**Sergey V. Antonenko**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Professor of the Department of Shipbuilding and Ocean Engineering  
Far Eastern Federal University  
690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8  
e-mail: sergey.antonenko.43@mail.ru

**Oleg E. Surov**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor, Department of Shipbuilding and Ocean Engineering  
Far Eastern Federal University  
690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8  
e-mail: surov-oe@rambler.ru

**Maxim V. Kitaev**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department of Shipbuilding and Ocean Engineering  
Far Eastern Federal University  
690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8  
e-mail: maxkit@mail.ru

### Abstract

In shipbuilding, for many structures, the ability to assess the technical condition of marine engineering, forecasting, working capacity and increasing the life of the ship is important. The life of ship structures is greatly influenced by the degree of wear of the hull connections, residual deformations, cracks, and other micro- and macrodefects. During operation, the ship experiences cyclic loads, which, together with corrosion wear and other factors, contribute to the accumulation of fatigue microcracks. The characteristic fatigue life of structures is determined by the degradation of case steel due to the development of its structural damage, which under conditions of low-cycle fatigue leads to the formation of dangerous cracks. Therefore, strength assessment and forecasting should be carried out taking into account the history of crack development. The studies of domestic scientists suggest diagnostic and analytical methods for calculating the fatigue strength and residual life of welded structures and their joints. For example, to assess and predict the residual life of the hull, the fatigue limit values of hull steel are used, which are determined based on the values of the structural damage length of the metal measured by the metallographic method. However, for the correct assessment of the fatigue strength and serviceability of steel structures and their welded joints, it becomes necessary to study the relationship between the sizes of defects (fatigue cracks) of steels, the parameters of cyclic loading and the duration of the fracture stages. In addition, to create models for the development of cracks, it is necessary to find out the values of the rates of their development in the subthreshold region of the kinetic diagram of fatigue fracture.

In this paper, we show a scheme for reducing performance, typical fatigue damage, structural damage to steel ship structures; mathematical models and a method for calculating the resource of a material according to structural and mechanical characteristics are proposed. The problem of constructing kinetic diagrams of fatigue fracture of ferrite-pearlite steels for their first and second sections in common connection has been solved. The concept of the development of engineering methods for assessing the reliability of materials and welded steel structures under cyclic loads is presented.

**Key words:** fatigue life, structural damage, cyclic loads, structural resource, microcrack, mathematical model.

**Введение**

Для сварных конструкций в машиностроении, кораблестроении и т.п. весьма важной является возможность прогнозирования их работоспособности и, соответственно, – обоснование увеличения срока эксплуатации. Техническое состояние и эксплуатационный ресурс зависят от многих факторов, влияющих на их прочность, долговечность и надежность [1], [2]. Основными из них являются различные дефекты, микротрещины, коррозионный износ и концентрация напряжений, как в сварных соединениях, так и в самих конструкциях. Кроме того, для увеличения срока эксплуатации необходимо проведение соответствующих профилактических и регламентных ремонтных работ. В этом плане хорошей иллюстрацией может служить схема снижения работоспособности морского судна в зависимости от времени его эксплуатации [3] (рис. 1). Для поддержания исправности объекта выполняются определенные ремонтные работы. Нижней границей зоны технического обслуживания на схеме является уровень необходимости в ремонте, а переход через этот уровень приводит к отказам. Восстановление же работоспособности до необходимого уровня должно осуществляться соответствующими видами ремонта.

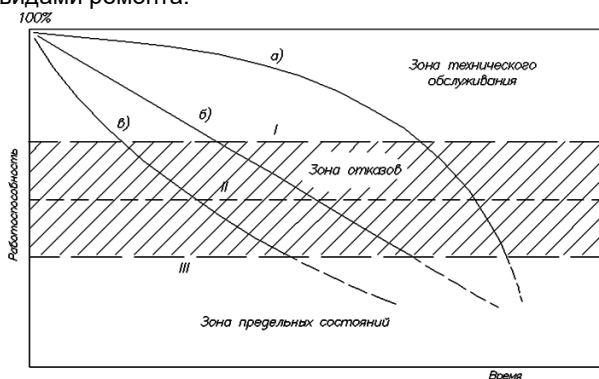


Рис. 1. Схема снижения работоспособности морских объектов в зависимости от времени и варианты снижения работоспособности: а – замедленный в начальный период использования и ускоренный в последующие периоды эксплуатации (трещащие пары при увеличении зазоров); б – пропорциональный времени использования (развитие усталостных разрушений до появления трещин); в – ускоренный в начальный период использования и замедленный в последующие периоды эксплуатации (коррозионное изнашивание конструкций). I – уровень необходимости в ремонте; II – установленный уровень отказа объекта; III – уровень безопасности

Техническое состояние корпуса судна устанавливается в зависимости от степени износа судовых конструкций, характеристик остаточных деформаций, трещин и других макро- и микродефектов материала. В процессе эксплуатации морской корабль испытывает повторяющиеся циклические нагрузки, которые совместно с коррозионным износом и другими факторами способствуют накоплению усталостных микротрещин. В конструкциях судов даже после нескольких лет эксплуатации из-за малоциклового

усталости часто появляются многочисленные трещины в местах повышенной концентрации напряжений: пересечения балок, жестких точках и пр. [4]. Примерами возникновения таких повреждений могут быть трещины сильно нагруженных конструкций судов смешанного плавания [5] и др. (рис. 2).

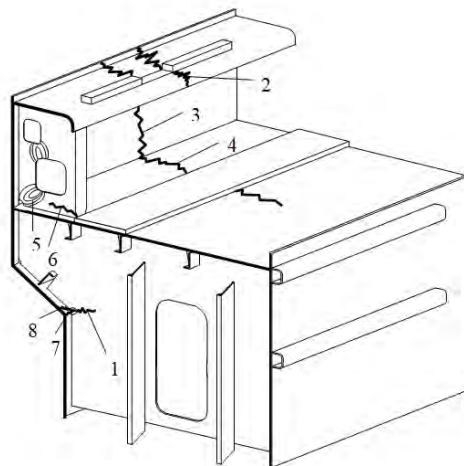


Рис. 2. Верхняя часть корпуса универсального судна:

- 1 – трещина в стенке рамного шпангоута;
- 2 – трещина в полке комингса в районе жесткой точки;
- 3 – трещина в комингсе;
- 4 – трещина в палубе;
- 5 – потеря устойчивости стенки контрфорса;
- 6 – трещина в стенке контрфорса;
- 7 – трещина в сварном шве;
- 8 – трещина в листе подпалубной цистерны у голубницы

В условиях циклического деформирования оценка технического состояния конструкций связана с поведением материалов на атомном или молекулярном уровне [6]. Металл «устает», и эксплуатационный ресурс корпуса уменьшается. Характеристику усталостной долговечности судовых конструкций достоверно определяет деградация корпусной стали вследствие развития ее структурной поврежденности. В настоящее время установлена однозначная зависимость между структурой материала и его сопротивлением разрушению [7]. Поэтому оценка прочности и прогнозирование должны осуществляться с учетом истории развития трещин.

Стадия образования макротрещины в конструкционных сталях, как правило, связана с накоплением кумулятивных повреждений. Процесс их накопления может быть замечен по результатам анализа микроструктуры материала. На рис. 3 показана структура металла в листах палубы танкера. По результатам снимков заметно, что после длительной эксплуатации возникает структурная поврежденность стали, приводящая к её охрупчиванию [8]. Основной причиной подобных повреждений судовых конструкций может являться как мало-, так и многоцикловая усталость, связанная с повышенными уровнями циклических напряжений, возникающих в местах концентрации напряжений при тяжелых погодных условиях эксплуатации конструкции.

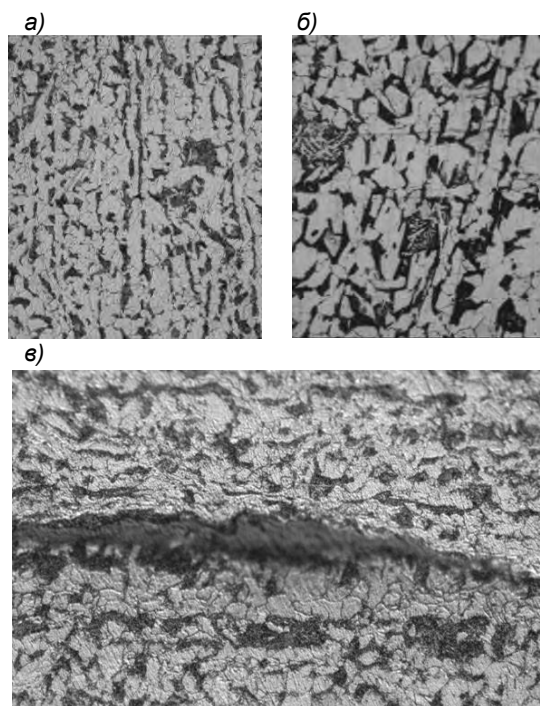


Рис. 3. Микроструктуры корпусной стали образца (увеличение  $\times 500$ ):  
 а - в исходном состоянии; б - после эксплуатации;  
 в - образование строчечной феррито-перлитной микроструктуры

В работах [4], [9] и др. описана методика прогнозирования и оценки эксплуатационного ресурса конструкций корпуса корабля, заключающаяся в определении размеров структурных повреждений контрольных накладных листов – «свидетелей», размещаемых в наиболее нагруженной части корпуса судна. Остаточный расчетный ресурс рассчитывается аналитически с использованием величины предела усталости корпусной стали, которую следует определять путем измерения металлографическим методом величины структурного повреждения одного из используемых накладных листов.

Однако для осуществления корректной оценки усталостной прочности и работоспособности стальных конструкций и их сварных соединений возникает необходимость проведения исследования взаимосвязи между размерами дефектов (усталостных трещин) сталей, параметрами циклических нагрузений и продолжительностями стадий разрушения. Кроме того, для создания моделей развития трещин необходимо выяснять значения скоростей их развития в *предпороговой области* кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР).

В рамках данного исследования разработаны математические модели развития трещин в феррито-перлитных сталях с учетом решения задачи в комплексе для первой и второй стадий разрушения на базе структурно механических критериев.

### 1. Метод оценки ресурса сварных конструкций, базирующийся на положениях феноменологических критериев прочности и структурного подхода

Процесс усталостного разрушения разделяют на две стадии, являющиеся основными составляющими ресурса конструкции: 1) образование макротрещины; 2) устойчивое развитие макротрещины до критических размеров.

Первая стадия характеризуется накоплением рассеянных в микрообъемах материала повреждений, приводящих к развитию микротрещин, которые на определенном этапе эксплуатации конструкции образуют одну или несколько макротрещин в окрестности наиболее опасных точек.

Описать развитие системы микротрещин с помощью структурных (физических) моделей чрезвычайно сложно.

Вследствие этого для оценки продолжительности первой стадии целесообразно использовать полуэмпирические модели [10], параметры которых можно рассчитать по сведениям о фактической поврежденности металла обследуемого элемента конструкции. Основу данного расчетного метода составляет гипотеза накопления повреждений, предложенная Генри и примененная в [7]. Согласно Генри, поврежденность при усталости может быть определена как отношение величины уменьшения предела выносливости к пределу выносливости исходного материала:

$$P = \frac{\sigma_{fr}^0 - \sigma_{fr}}{\sigma_{fr}^0}, \quad (1)$$

где  $P$  – поврежденность;  $\sigma_{fr}^0, \sigma_{fr}$  – пределы выносливости исходного и поврежденного металла соответственно.

При формулировке гипотезы Генри [11] предполагается также, что кривая усталости может быть аппроксимирована выражением:

$$N = \frac{k}{\sigma - \sigma_{fr}^0}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – амплитуда приложенного напряжения;  $k$  – постоянная материала;  $N$  – количество циклов до появления макротрещины.

Предполагается, что при накоплении повреждений форма кривой усталости не изменяется:

$$N_r = \frac{k'}{\sigma - \sigma_{fr}^0}, \quad (3)$$

где  $N_r$  – оставшееся количество циклов до разрушения.

Анализ экспериментальных данных позволил Генри записать условие в виде:

$$\frac{k'}{k} = \frac{\sigma_{fr}}{\sigma_{fr}^0}. \quad (4)$$

Используя (2), (3), из (4), найдем отношение  $N_r/N$ , определяющее долю остаточного ресурса:

$$\frac{N_r}{N} = \frac{\sigma_{fr}(\sigma - \sigma_{fr}^0)}{\sigma_{fr}^0(\sigma - \sigma_{fr})}. \quad (5)$$

Определив количество циклов развития макротрещины от своего минимального размера до критического, можно по выражению (5) рассчитать

полный и остаточный ресурс элементов конструкций при любых параметрах нагружения и для любой структурной поврежденности металла, полученной на первой стадии, рис. 4:

$$N_r = \frac{N_{II} [\sigma_{fr}(\sigma - \sigma_{frL}) - \sigma_{frL}(\sigma - \sigma_{fr})]}{\sigma_{frL}(\sigma - \sigma_{fr})} \quad (6)$$

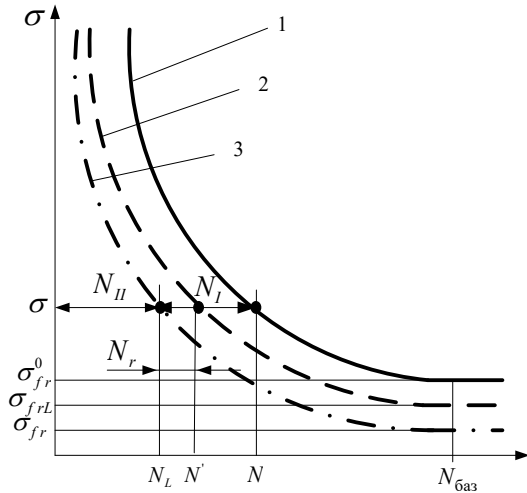


Рис. 4. Схема определения полного и остаточного ресурса:

1 – кривая усталости исходного материала;  
 2 – кривая усталости поврежденного металла на первой стадии; 3 – кривая усталости металла, у которого имелась трещина, равная минимальному размеру макротрещины ( $N_I, N_{II}, N_r, N$  – стадия зарождения макротрещины, стадия развития макротрещины, остаточный ресурс до зарождения макротрещины, наработка конструкции соответственно)

При расчете полного ресурса вместо  $N_r$  необходимо подставить количество циклов развития макротрещины  $N_{II}$ . В итоге получаем выражение:

$$N_I = \frac{N_{II} [\sigma_{fr}^0(\sigma - \sigma_{frL}) - \sigma_{frL}(\sigma - \sigma_{fr}^0)]}{\sigma_{frL}(\sigma - \sigma_{fr}^0)} \quad (7)$$

где  $N_I, N_{II}$  – ресурс первой и второй стадий разрушения соответственно;  $\sigma_{frL}$  – предел выносливости металла с трещиной, равной минимальному размеру макротрещины  $L_{min}$ .

При наличии поврежденности металла, т.е. когда имеется известное значение предела выносливости  $\sigma_{fr}$  с макротрещиной, большей  $L_{min}$ , остаточный ресурс рассчитывается по зависимости (6).

Общий ресурс конструкции может быть представлен как сумма ресурсов обеих стадий разрушения:

$$N = N_I + N_{II} \quad (8)$$

Расчет пределов выносливости  $\sigma_{fr}$  при различных параметрах нагружения выполняется по формулам [7]:

$$\sigma_{fr}^0 = \sigma_{fc} / \sqrt{\pi l_0 \left( \frac{\sigma_{fc}}{K_{thr}} \right)^2 + 1 - \mu + \mu^2} \quad (9)$$

$$\sigma_{fr} = \sigma_{fc} / \sqrt{\pi l \left( \frac{\sigma_{fc}}{K_{thr}} \right)^2 + 1 - \mu + \mu^2} \quad (10)$$

где  $\sigma_{fc} = \begin{cases} \sigma_{0,2}(0,3r + 1), & \text{если } r \leq 0; \\ \sigma_{0,2}, & \text{если } r > 0; \end{cases}$  – циклический предел текучести.

Так как микротрещина размером  $l_0$  не изменяет предел выносливости, то можно принять, что такие трещины имеют место в исходном материале, и предел выносливости неповрежденного металла можно определять по формуле (9). При структурном повреждении металла развивается система микротрещин [12], [13], которая характеризуется определенным законом распределения. Функцию распределения  $l$  для поврежденного металла необходимо находить экспериментально, используя неразрушающие металлографические и капиллярные методы обнаружения поверхностных трещин. Определив функцию распределения размеров микротрещин для обследуемого элемента и назначив точность оценки, можно найти искомый размер  $l$ , который определяет значение предела выносливости поврежденного материала.

Величину макротрещины, которая соответствует окончанию первой стадии, можно определить из аналитической зависимости [13]:

$$L_{min} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_{th0}}{M \cdot \sigma_{max}} \right)^2 \quad (11)$$

Здесь

$$K_{th0} = \sqrt{\frac{[R_{mce} \cdot D]^{(\frac{1}{m}+1)} \cdot 4\pi d_{стр}}{1,7(\sigma_{0,2})^{(\frac{1}{m}-1)}}} \quad (12)$$

где  $K_{th0}$  – пороговый коэффициент интенсивности напряжений при отнулевом цикле;  $\sigma_{max}$  – максимальное напряжение в цикле нагрузки;  $M$  – коэффициент поправки на форму трещины.

Критическую длину трещины также можно найти по формуле (11), подставив в нее вместо порогового коэффициента интенсивности выражение для критического коэффициента интенсивности:

$$K_{1c} = \sqrt{\frac{[R_{mce} \cdot D]^{(\frac{1}{m}+1)} \cdot 6,18\pi d_3}{q^{(\frac{1}{m}+1)} \cdot \sigma_{0,2}^{(\frac{1}{m}-1)}}} \quad (13)$$

Таким образом, согласно выражению (6) для определения ресурса на первой стадии разрушения (зарождения макротрещины минимального размера) необходимо определить ресурс для второй стадии разрушения.

В этом случае количество циклов, необходимое для разрушения металла в окрестности вершины трещины для  $m$ -го шага роста трещины, рассчитывается по формуле:

$$N_m = \frac{1 - \varepsilon_i^p / \varepsilon_f - \sum_{j=0}^{m-1} P_{mj}}{[\Delta \varepsilon_i^p(m) / c]^{\frac{1}{n}}} \quad (14)$$

где  $\varepsilon_i^p$  – интенсивность пластических деформаций;  $\varepsilon_f$  – критическая пластическая деформация;  $\Delta \varepsilon_i^p(m)$  – размах интенсивности пластических деформаций;  $c = \varepsilon_f / 2$  – коэффициент Коффина-Мэнсона;  $P$  – поврежденность материала на данном шаге продвижения трещины, схема определения которой может быть получена с использованием [14]. Процедура определения параметров  $\varepsilon_i^p, \varepsilon_f,$

$\Delta e_i^p(m)$  отвечает моделям, изложенных в работах [14], [7].

В общем случае для расчетной оценки ресурса сварной конструкции на начальной стадии расчета необходимо, как правило, знать: распределение температур и механические характеристики металла в зоне термического влияния; остаточные сварочные напряжения; геометрические характеристики формы сварного соединения; критерии оценки усталостной прочности; пороговые характеристики; критические характеристики; коэффициент асимметрии цикла.

## 2. Модель оценки ресурса сварных конструкций

Проблемы технической диагностики высоконагруженных стальных конструкций остаются актуальными в настоящее время в связи с необходимостью прогнозирования их работы и повышения эксплуатационного ресурса. Анализ проблем обеспечения надежности крупногабаритных сварных конструкций показывает, что дополнительные возможности для повышения точности и достоверности оценок ресурса конструкций на стадии проектирования может обеспечить системный мониторинг. Он базируется на неразрушающих методах диагностики и позволяет получать часть недостающей информации путем обследования сооружений на стадии изготовления или эксплуатации.

Известно, что физические процессы и особенности их протекания на *мезоскопическом* (среднем, промежуточном) уровне отражают способность материала сопротивляться разрушению и определяют значения макропараметров, характеризующих процесс зарождения и развития трещин. Следовательно, наиболее полные сведения о состоянии материала можно получить в рамках именно *мезоскопического уровня*. Базируясь на этих сведениях, следует оценивать способность материала к образованию развивающихся макротрещин.

Разрушение является многостадийным и многофакторным процессом. Поэтому описать все стадии процесса в рамках одной модели не всегда удается.

При усталостном разрушении целесообразно принимать, что ресурс изделия складывается из продолжительности стадии накопления рассеянных повреждений (инкубационный период), приводящей к образованию макротрещины, и стадии развития макротрещины до критических размеров, рис. 5.

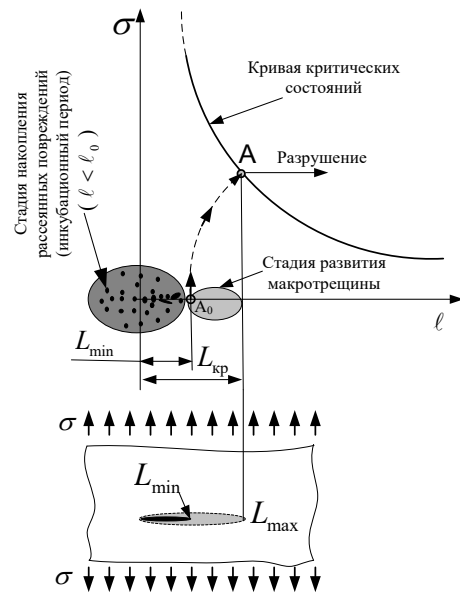


Рис. 5. Стадии накопления повреждений и развития макротрещин (схематизация)

Если разработать способ определения поврежденности по данным распределения длин микротрещин и расчетную методику определения коэффициентов интенсивности напряжений, то указанные модели могли бы эффективно использоваться в инженерных расчетах, однако такой способ, скорее всего, должен использовать недетерминистические подходы.

Естественно, что на работоспособность элементов конструкций существенно влияют последствия технологических воздействий на металл в процессе изготовления. Например, результирующий конгломерат структур и диаметр зерна, полученные после сварки, могут значительно изменять способность сварного соединения сопротивляться возникновению развивающейся макротрещины.

## 3. Математическая модель к оценке эксплуатационного ресурса конструкций из феррито-перлитных сталей

Предельные напряжения и циклы до разрушения оцениваются на базе кинетических закономерностей развития трещины. В общем виде для материала при переменном нагружении зависимость скорости роста  $dL/dN$  усталостной трещины от размаха коэффициента интенсивности  $\Delta K$  в логарифмических координатах представляется кривой, состоящей из 3 областей. Докритическое устойчивое развитие (стабильное) происходит в областях 1 и 2. Область 3 характерна для критического ускоренного развития. В этой области развитие трещины нестабильно и имеет максимальную скорость. Отметим известный факт



– график зависимости в логарифмических координатах в области 2 прямолинейный и отлично коррелирует с экспериментальными данными.

Область 1 соответствует значениям  $\Delta K$ , при которых гипотетическая трещина длиной  $l_0$  в малоуглеродистых сталях растет, по одним данным [15] со скоростями  $2,5 \cdot 10^{-10} \div 2,5 \cdot 10^{-11}$  м/цикл, по другим [16] —  $10^{-8} \div 10^{-9}$  м/цикл. Введем обозначение «стартовой» скорости  $V_{l0}$  для этой гипотетической микротрещины, присутствующей в материале и являющейся лидирующей. Точка со значением этой скорости соответствует начальному размаху коэффициента интенсивности напряжений с нулевой асимметрией цикла  $K_{l0}$  КДУР. Значение коэффициента интенсивности напряжений в ней может быть вычислено по формуле:

$$K_{l0} = \sigma_{1max} \cdot M \cdot \sqrt{\pi \cdot l_0}, \quad (15)$$

где  $M$  – коэффициент поправки на форму трещины;  $\sigma_{1max}$  – напряжение внешней нагрузки отнулевого цикла.

Поведение трещины в области 2 в начале стабильного распространения представляет особый практический интерес, так как характеризует окончание первой стадии развития трещины и смену механизма накопления повреждений. По данным [17], [16] переход трещины в стабильное состояние для углеродистой стали происходит при скоростях  $V_{th} = (1 \div 9) \cdot 10^{-9}$  м/цикл и  $V_{th} = 5 \cdot 10^{-8}$  м/цикл соответственно. Переход в стабильное состояние трещины нормального отрыва будет характеризоваться коэффициентом интенсивности напряжений  $K_{1max}$  и условием:

$$K_{1max} = K_{th0}, \quad (16)$$

где  $K_{th0}$  – пороговый коэффициент интенсивности напряжений, значение которого соответствует началу второй стадии разрушения.

Согласно модели развития трещины по Дж. Си и структурным зависимостям [10], [18], продвижение трещины происходит на пороговый скачок, равный  $r_{th0}$ . Он зависит от размера зерна  $d_g$  феррито-перлитной стали, критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_{1c}$  и  $K_{th0}$ . Начало стабильного разрушения и совершение порогового скачка требует накачки энергии, которая зависит от количества циклов. Количество циклов для продвижения трещины асимптотически убывает на всем протяжении через все стадии разрушения. Следовательно, определив необходимую пороговую критическую энергию для накачки в виде числа циклов, можно найти скорость в момент порогового скачка трещины.

Рассмотрим случай, когда нагрузка действует в поперечном направлении от распространения трещины, и запишем уравнение Пэриса для первого участка в известной форме [19]:

$$\frac{dL}{dN} = B \left( \frac{\Delta K_1}{K_{th0}} \right)^m = B \left( \frac{K_{1max}(1-r)}{K_{th0}} \right)^m, \quad (17)$$

где  $B$  – постоянная материала, имеет размерность длины;  $m$  – показатель степени, константа материала, определяемая по

экспериментальным кривым роста трещины;  $K_{th0}$  – пороговый коэффициент интенсивности напряжений;  $r = K_{1min}/K_{1max}$  – коэффициент асимметрии цикла. Для нахождения коэффициентов  $B$  и  $m$  воспользуемся узловыми точками начала и окончания первой области КДУР. Для этого согласно условиям окончания и начала первой области диаграммы (граничным условиям для первого участка) подставим в (17) скорость  $V_{th}$  и условие (16), и  $V_{l0}$  и  $K_{l0}$  соответственно. Запишем скорости системой уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} V_{l0} = B \left( \frac{K_{l0} \cdot (1-r)}{K_{th0}} \right)^m; \\ V_{th} = B \cdot (1-r)^m. \end{cases} \quad (18)$$

Решая систему (18) относительно неизвестных  $B$  и  $m$ , получаем:

$$\begin{cases} m = \log \left( \frac{K_{l0}}{K_{th0}} \right) \left( \frac{V_{l0}}{V_{th}} \right); \\ B = V_{l0} / (1-r)^m, \end{cases} \quad (19)$$

где  $V_{th}$  и  $V_{l0} = (2,5 \cdot 10^{-9} \dots 2,5 \cdot 10^{-11})$  м/цикл – скорость в конце первой стадии разрушения и гипотетическая скорость начала накопления повреждений, соответственно. Скорость  $V_{th}$  является постоянной для данного материала и напрямую зависит от его структуры, в то время как  $V_{l0}$  точно не определена. Вероятно,  $V_{l0}$  и  $V_{th}$  могут коррелировать через параметр структуры материала  $d_g$  так, что кривая КДУР будет наилучшим образом описывать экспериментальные данные. То есть равенство  $V_{l0}/d_g = const$  наилучшим образом описывает экспериментальные данные, например, для класса феррито-перлитных сталей.

Подставляя значения коэффициентов из (19) в (17), получаем расчетное кинетическое уравнение для описания первого участка КДУР. В (17)  $K_{1max}$  зависит от коэффициента поправки на форму трещины, максимальных напряжений и длины трещины и записывается известным выражением:

$$K_{1max} = M \cdot \sigma_{1max} \sqrt{\pi l}. \quad (20)$$

Подставляя (20) в (17) с использованием коэффициентов из (19) и проинтегрировав полученное уравнение по длине трещины  $l_0 \div L_{min}$ , можно рассчитать количество циклов  $N_I$  для подрастания трещины в этом диапазоне при стационарном режиме циклического нагружения:

$$N_I = \int_{l_0}^{L_{min}} \frac{1}{B} \left( \frac{M \cdot \sigma_{1max} \sqrt{\pi l} \cdot (1-r)}{K_{th0}} \right)^{-m} dl, \quad (21)$$

где  $K_{th0}$  и  $M$  – коэффициент, вычисляемый согласно [20], и коэффициент, принимаемый для поверхностных трещин 0,9 [21], поправки на форму трещины, зависящий от толщины металла, глубины трещины [22] соответственно. Для расчета количества циклов  $N_I$  первообразная функция будет выглядеть аналогично полученной в работе [23].

Начало стадии устойчивого развития сравнительно четко определено скоростью и критическими характеристиками структурной модели разрушения, а также малой чувствительностью к результату (21) в области, где трещина имеет пороговую величину.

В области же минимальных микротрещин начальная скорость  $V_{I0}$  её развития не может быть определена точно на основе вполне определенных критериев или физико-механических характеристик сталей. Здесь выражение (21) особенно «чувствительно» к начальной длине  $l_0$ . Поэтому от неё будет сильно зависеть получаемое количество циклов на первой стадии разрушения.

Ресурс материала на этапе стабильного развития трещины легко вычисляется после нахождения первообразной из (21). На первой стадии ресурс будет представлять собой разность:

$$N_I = N(L_{min}) - N(l_0), \quad (22)$$

из которой можно определить  $V_{I0}$ , если положить  $N_I + N_{II} = 2 \cdot 10^8$  циклов (базовое значение) на пределе выносливости, где  $N_{II}$  – величина известная.

Второй способ определения  $V_{I0}$  может быть основан на концепции критической плотности энергии упругой деформации, предложенной Дж.Си., [17], [18, с.129].

Авторы работы [24] для стали 35 экспериментально исследовали скорости распространения трещины в предпороговой области. Установлено, что в пределах размера трещины  $10d_g$  имеет место более значительный разброс значений скорости роста малой трещины, чем при росте макротрещины. Также определено, что при характерном размере макротрещины  $10d_g$  прекращается значительный разброс скоростей, и поведение кривой КДУР приобретает характер средней области. Следует отметить, что при разных скоростях порогового развития макротрещины характерная скорость  $V_{th} = 10^{-9}$  м/цикл и соответствующая ей длина трещины – константы для данного материала или, возможно, группы сталей феррито-перлитного класса.

Для данного класса феррито-перлитных сталей пороговая скорость  $V_{th}$  может быть определена через пороговый шаг минимальной макротрещины как отношение его к рассчитанному через характерную скорость постоянному коэффициенту, то есть

$$V_{th} = r_{th}/240, \quad (23)$$

где  $r_{th}$  – можно вычислить по известной зависимости [7],

$$r_{th} = 0,618K_{th0}^2 \cdot d_g/K_{1c}^2, \quad (24)$$

а значение 240 – коэффициент, вычисленный по характерной пороговой скорости феррито-перлитных сталей.

Результаты описания КДУР для стали 35 (рис. 6) показывают хорошее согласование с экспериментальными данными [24], полученными при испытании по симметричному циклу и рабочей нагрузке в 240 МПа, приблизительно

соответствующей пределу выносливости.

Формула (23) дает хорошее согласование для различных марок сталей.

Найдем гипотетический шаг микротрещины  $r_{thl0}$  размером  $l_0$ . Используя известное пороговое значение шага  $r_{th} = 0,618d_g$  из

$$r_{thl0}/r_{th} = (K_{I0}/K_{th0})^2, \quad \text{откуда} \quad (25)$$

$$r_{thl0} = r_{th} \cdot (K_{I0}/K_{th0})^2,$$

и после подстановки и сокращений окончательно имеем следующее выражение:

$$r_{thl0} = 0,618d_g(K_{I0}/K_{1c})^2. \quad (26)$$

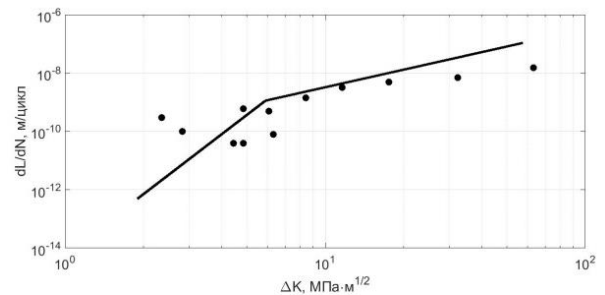


Рис. 6. Результаты описания начальной и стабильной стадий разрушения с использованием структурно механических и энергетических подходов (— - расчёт; • - эксперимент [24])

### Заключение

Таким образом, предложены расчетная модель и метод определения усредненных накоплений рассеянных повреждений на базе закона Пэриса, что позволяет обойтись без использования статистических подходов к описанию плотности развития трещин и величины лидирующей микротрещины, способной перейти границу и стать развивающейся.

Результаты расчетов скорости трещины по предложенному методу показывают усредненные значения на стадии образования макротрещины, а на стадии стабильного развития её – ложатся по верхним значениям экспериментальных данных. Анализ свидетельствует, что результаты расчета по данному методу идут в запас прочности.

Так как основой разработанного метода являются структурно-механические подходы к разрушению, результаты работы могут быть применены для оценки ресурса материала в зоне механической и структурной неоднородности сварных соединений. Представленная концепция развития инженерных методов оценки надежности материалов при циклических нагрузках может быть использована в расчетной практике судостроительных, строительных и машиностроительных конструкций.

### Литература

- Новиков В.В., Турмов Г.П. Эксплуатационный ресурс судна: монография. - Владивосток: ДВФУ, 2013. - 200 с.
- Оценка технического состояния корпусов морских судов. / Максимаджи А.И., Беленький Л.М., Брикер А.С., Неугодов А.Ю. - Л.: Судостроение, 1982. - 156 с.
- Чапкис Д.Т. Ремонтопригодность морских судов. - Л.: Судостроение, 1978. - 256 с.
- Казанов Г.Т., Новиков В.В., Турмов Г.П. Концентрация напряжений и другие особенности напряженного состояния судовых корпусных конструкций. - Владивосток: ДВФУ, 2014. - 178 с.
- Новиков В.В., Турмов Г.П., Сувор О.Э., Горетый О.А. Прочность конструкций судов с широким раскрытием

- палуб. Учеб. пособие. Владивосток: ФГАОУ ВПО ДВФУ, 2016. - 146 с.
6. Аносов А.П. Термодинамические аспекты циклической прочности судостроительных сталей. - Владивосток: ДВФУ, 2012. - 348 с.
  7. Матохин Г.В. Оценка ресурса сварных конструкций из перлитно-ферритных сталей: Монография. - Владивосток: ДВГТУ, 2001. - 202 с.
  8. Антоненко С.В. Восстановление общей продольной прочности танкера «Владимир Колечицкий» методом подкрепления главной палубы / Новиков В.В., Шемендюк Г.П., Казанов Г.Т., Мельник В.В. // Технология судоремонта. №1. – 2007. С.5-13.
  9. Казанов Г.Т. Способ оценки технического состояния корпуса судна. Патент №24754. <http://www.findpatent.ru/patent/247/2475404.html>.
  10. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. - М.: 1990. - 446 с.
  11. Henry D.L. A theory of fatigue damage accumulation in steel. Transaction ASME, 1955, v.77. №6. P. 913-918.
  12. Токаджи К., Андо Д. Статистические характеристики прочности материалов: Металлические материалы // Дзайре. - 1982. - С.102-107.
  13. Доможиров Л.И. Теоретический анализ влияния коротких трещин на предел выносливости материалов // Проблемы прочности. - 1983. - №7. - С.35-40.
  14. Карзов Г.П., Леонов В.П., Марголин Б.З. Механическая модель развития усталостной трещины // Проблемы прочности. - 1985. - №8. - С.9-14.
  15. Бьюи Х.Д. Механика разрушения: обратные задачи и решения. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 412 с.
  16. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. - М.: Metallurgy, 1975. - 454 с.
  17. Ботвина Л.Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. - М.: Наука, 1989. - 230 с.
  18. Матохин Г.В., Горбачев К.П. Инженеру о сопротивлении материалов разрушению. - Владивосток: Дальнаука, 2010. - 281с.
  19. Хажинский Г.М. Механика мелких трещин в расчетах прочности оборудования и трубопроводов. - М.: Физматкнига, 2008. - 256 с.
  20. Матохин Г.В., Горбачев К.П. Основы расчетных методов линейной механики разрушения. Владивосток: ДВГТУ, 2008. 304 с.
  21. Матохин Г.В., Молоков К.А. Прочность и надежность сварных соединений: учебное пособие для вузов. Владивосток: ДВФУ, 2019. 143 с.
  22. Молоков К.А. Некоторые аспекты формирования контура поверхностных трещин. // Вестник Инженерной школы Дальневост. федерал. ун-та. 2015. № 4(25). С.75-79.
  23. Молоков К.А., Домашевская Я.Р. Оценка ресурса сварных соединений из феррито-перлитных материалов в условиях низких температур. // Материалы третьей международной научной конференции Полярная механика - 2016. С.618-628.
  24. Файвисович А.В., Чура М.Н. Приближенный метод оценки продолжительности начальной стадии усталостного разрушения судовых гребных валов. // Транспортное дело России. 2011. №10. С.79-80.

#### References

1. Novikov V.V., Turmov G.P. The operational resource of the vessel: monograph. - Vladivostok: FEFU, 2013. -- 200 p.
2. Assessment of the technical condition of the hulls of marine vessels. / Maksimadzhi A.I., Belenky L.M., Briker A.S., Neugodov A.Yu. - L.: Shipbuilding, 1982. - 156 p.
3. Chapkis D.T. Maintainability of sea vessels. - L.: Shipbuilding, 1978. - 256 p.
4. Kazanov G.T., Novikov V.V., Turmov G.P. Stress concentration and other stress characteristics of ship hull structures. - Vladivostok: FEFU, 2014. -- 178 p.
5. Novikov V.V., Turmov G.P., Surov O.E., Goretiy O.A. Strength of ship designs with wide open decks. Textbook allowance. Vladivostok: FGAOU VPO FEFU, 2016. -- 146 p.
6. Anosov A.P. Thermodynamic aspects of the cyclic strength of shipbuilding steels. - Vladivostok: FEFU, 2012. -- 348 p.
7. Matokhin G.V. Estimation of the resource of welded structures made of pearlite-ferritic steels: Monograph. - Vladivostok: DVGTU, 2001. -- 202 p.
8. Antonenko S.V. The restoration of the total longitudinal strength of the tanker Vladimir Kolechitsky by reinforcing the main deck / Novikov V.V., Shemendyuk G.P., Kazanov G.T., Melnik V.V. // Technology of ship repair. No. 1. - 2007. P.5-13.
9. Kazanov G.T. A method for assessing the technical condition of the hull. Patent No. 24754. <http://www.findpatent.ru/patent/247/2475404.html>.
10. Bolotin V.V. Resource machines and structures. - M.: 1990. - 446 p.
11. Henry D.L. A theory of fatigue damage accumulation in steel. Transaction ASME, 1955, v. 77. No. 6. P. 913-918.
12. Tokaji K., Ando D. Statistical characteristics of the strength of materials: Metallic materials // Zaire. - 1982. - P.102-107.
13. Domozhrov L.I. Theoretical analysis of the effect of short cracks on the endurance of materials // Problems of strength. - 1983. - No. 7. - P.35-40.
14. Karzov G.P., Leonov V.P., Margolin B.Z. A mechanical model for the development of a fatigue crack // Problems of Strength. - 1985. - No. 8. - P.9-14.
15. Buoy H.D. Fracture mechanics: inverse problems and solutions. Moscow: FIZMATLIT, 2011.412 p.
16. Ivanova V.S., Terentyev V.F. The nature of metal fatigue. - M.: Metallurgy, 1975. -- 454 p.

17. Botvina L.R. Kinetics of the destruction of structural materials. - М.: Nauka, 1989. -- 230 p.
18. Matokhin G.V., Gorbachev K.P. Engineer on the resistance of materials to destruction. - Vladivostok: Dalnauka, 2010. --281 p.
19. Khazhinsky G.M. The mechanics of small cracks in calculating the strength of equipment and pipelines. - М.: Fizmatkniga, 2008. -- 256 p.
20. Matokhin G.V., Gorbachev K.P. Fundamentals of calculation methods of linear fracture mechanics. Vladivostok: Far Eastern State Technical University, 2008. 304 p.
21. Matokhin G.V., Molokov K.A. Strength and reliability of welded joints: a textbook for universities. Vladivostok: FEFU, 2019. 143 p.
22. Molokov K.A. Some aspects of the formation of the contour of surface cracks. // Bulletin of the Engineering School of the Far East. federal un-that. 2015. No. 4 (25). P.75-79.
23. Molokov K.A., Domashevskaya Ya.R. Estimation of the resource of welded joints from ferrite-pearlite materials at low temperatures. // Materials of the third international scientific conference Polar Mechanics - 2016. P.618-628.
24. Fayvisovich A.V., Chura M.N. An approximate method for assessing the duration of the initial stage of fatigue failure of ship propeller shafts. // Transport business in Russia. 2011. No. 10. FROM.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629.015

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ В ЗАДАЧЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛЬДА И СУДНА, ДВИЖУЩЕГОСЯ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ

**Константин Андреевич Костылев**

кандидат технических наук, заведующий сектором гидроакустического инжиниринга  
Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики Российской академии наук»  
603950, г. Нижний Новгород. БОКС - 120, ул. Ульянова, 46  
e-mail: kostylev@ipfran.ru

**Дмитрий Олегович Городецкий**

мнс, аспирант кафедры Кораблестроения и авиационной техники  
Нижегородский государственный университет им. Р. Е. Алексеева  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24  
e-mail: dg@ipfran.ru

#### Аннотация

В ходе построения математических моделей системы взаимодействия судна и буксируемой им аппаратуры, осуществляемого на основе результатов измерений вибраций модели связанной системы «судно-трос-аппаратура» (масштаб 1:100), буксируемой в ледовом бассейне, была выявлена недостаточность продолжительности хода модели по ледовому бассейну для корректной оценки получаемых результатов. Для устранения этого противоречия был применен прием виртуального удлинения длины пробега модели путем прогнозирования временного ряда перемещений аппаратуры и судна в модуле statsmodels языка программирования Python. Построенные модели и выданные ими прогнозы достаточно хорошо передают характер колебаний системы. Полученные с их помощью результаты применимы для анализа вибраций судна с буксируемой аппаратурой во льду. Внедрение приема прогнозирования временных рядов движения моделей судна и буксируемой аппаратуры значительно расширяет возможности технологий моделирования ледовой среды при испытаниях моделей судов, что, в свою очередь, упрощает задачу проектирования методики проведения подводно-подледной сейсмоакустической разведки с использованием ледокольного судна и разработки специальных технических средств для её осуществления.

**Ключевые слова:** лед, ледокол, сопряженная задача динамики твердого тела и подводной тросовой системы, временные ряды, прогнозирование, статистики.

### FORECASTING TIME SERIES DATA IN THE PROBLEM OF MODELING INTERACTION OF ICE AND A VESSEL MOVING IN ICE CONDITIONS

**Konstantin A. Kostylev**

Ph.D., Head of the Sonar Engineering Sector  
Federal Research Center "Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences"  
603950, Nizhny Novgorod, BOX - 120, st. Ulyanova, 46  
e-mail: kostylev@ipfran.ru

**Dmitry O. Gorodetsky**

Research Assistant, Graduate Student of the Department of Shipbuilding and Aviation technology  
Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev,  
603950, Nizhny Novgorod, st. Minina, 24  
e-mail: dg@ipfran.ru

#### Abstract

During designing mathematical models of interaction system of a vessel and equipment towed by it, carried out on the basis of vibration measurements of the model of a vessel-tow wire-equipment connected system (scale 1: 100), towed in the ice basin, an insufficiency in duration of the model's endurance time in the ice basin, in order to correctly assess the results, was revealed. To eliminate this contradiction, a virtual extension of the model's path length was applied by predicting the time series of travel of the equipment and the vessel in the statsmodels module of the Python programming language. Designed models and the forecasts issued by them quite well convey the nature of the oscillations of the system. The results obtained with their help are applicable for vibration analysis of a vessel with towed equipment in ice. The introduction of a method for predicting the time series of ship models and towed equipment travel significantly expands the capabilities of ice modeling technologies for testing ship models, which, in turn, simplifies the task of designing methods for conducting under-ice seismic-acoustic exploration using an ice-class vessels and developing special technical means for it implementation.

**Key words:** ice, icebreaker, conjugate problem of the dynamics of a solid body and an underwater tow-wire system, time series, forecasting, statistics.

**Введение**

Под прогнозированием временного ряда подразумевается, что зная значение произвольной случайной величины в прошлом, можно предсказать его в будущем. Формально задача ставится как поиск функции  $f_T$ :

$$y_{T+d} = f_T(y_T, \dots, y_1, d) \equiv \hat{y}_{T+d|T} \quad (1)$$

где  $d \in \{1, \dots, D\}$  - отсрочка прогноза,  $D$  – горизонт прогнозирования.

Из постановки задачи ясно, что прогноз значения величины в будущем строился на основании уже известных значений величины в прошлом. За количественную оценку сходства между значениями ряда в соседних точках принималась автокорреляционная функция – корреляция Пирсона ( $r_\tau$ ) между исходным рядом и его версией, сдвинутой на несколько отсчетов. Вычислялась корреляция Пирсона по выборке по формуле:

$$r_\tau = \frac{\sum_{t=1}^{T-\tau} (y_t - \bar{y})(y_{t+\tau} - E_y)}{\sum_{t=1}^{T-\tau} (y_t - \bar{y})^2}, \quad (2)$$

где  $\tau$  – лаг автокорреляции, т.е. количество отсчетов, на которое сдвинут ряд;  $E_y$  мат. ожидание величины  $y$ ;  $\bar{y}$  - выборочное среднее.

Проверка рядов на стационарность осуществлялась критерием Дики-Фуллера, т.к. для него существует стандартная реализация в библиотеках языка Python.

Стабилизация дисперсии осуществлялась преобразованием Бокса-Кокса в силу его простоты:

$$y'_t = \begin{cases} \ln(y_t), & \text{при } \lambda = 0 \\ \frac{(y_t^\lambda - 1)}{\lambda}, & \text{при } \lambda \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

где  $\lambda$  – параметр преобразования (если  $\lambda=0$ , то ряд логарифмируется, если  $\lambda = 1$  – осуществляется тождественное преобразование ряда, в остальных случаях осуществляется степенное преобразование ряда).

Непосредственное прогнозирование осуществлялось с помощью модели SARIMAX, стандартная реализация которой присутствует в модуле statsmodels.api [2]. Данная модель состоит из комбинации авторегрессионной модели порядка  $p$  (AR(p)) и модели скользящего среднего порядка  $q$  (MA(q)), к которой применены два допущения [3]:

1. Теорема Вальда: любой стационарный ряд может быть описан моделью ARMA(p,q) с любой наперед заданной точностью;

2. При помощи дифференцирования нестационарный ряд можно сделать стационарным.

Таким образом, получаем модель ARIMA(p,d,q) — это модель ARMA(p,q) для  $d$  раз продифференцированного ряда. Ещё одним компонентом модели SARIMAX является часть, отвечающая за оценку сезонности прогнозируемого ряда. Пусть ряд имеет сезонный период длины  $S$ . Тогда для его прогнозирования можно взять модель ARMA(p, q):

$$y_t = \alpha + \varphi_1 y_{t-1} + \varphi_2 y_{t-2} + \dots + \varphi_p y_{t-p} + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q}, \quad (4.1)$$

добавить к этой модели  $P$  авторегрессионных компонент, но не предыдущих, а с шагом, равным периоду сезонности:

$$+\varphi_S y_{t-S} + \varphi_{2S} y_{t-2S} + \dots + \varphi_{PS} y_{t-PS}, \quad (4.2)$$

и  $Q$  компонент скользящего среднего, также с шагом, равным периоду сезонности:

$$+\theta_S \varepsilon_{t-S} + \theta_{2S} \varepsilon_{t-2S} + \dots + \theta_{QS} \varepsilon_{t-QS}, \quad (4.3)$$

где  $y_t$  – отклик,  $\alpha, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$  – параметры модели, которые необходимо оценить,  $\varepsilon_t$  – шумовая компонента, описывающая отклонения значений ряда от данного уравнения.

Результат — это модель SARMA(p, q) × (P, Q). Если ряд, подаваемый на вход этой модели  $D$  раз подвергнуть сезонному дифференцированию и  $d$  раз обычному, то получим искомого модель SARIMA(p, d, q) × (P, D, Q). Если остатки этой модели также подвергнуть прогнозированию моделью ARIMA, то придём к модели SARIMAX. Значение ряда  $y$  в момент времени  $t$  в этой модели задается следующим образом:

$$y_t = \sum_{j=1}^k \beta_j y_{jt} + z_t, \quad (5)$$

где  $z_t = \alpha + \varphi_1 z_{t-1} + \dots + \varphi_p z_{t-p} + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} + \varphi_S z_{t-S} + \dots + \varphi_{PS} z_{t-PS} + \theta_S \varepsilon_{t-S} + \dots + \theta_{QS} \varepsilon_{t-QS} + \varepsilon_t$ .

Таким образом, получаем следующий алгоритм построения прогноза:

- Построение графика ряда и осуществление его визуального анализа;
- Стабилизация дисперсии (при необходимости). Стабилизация производится с помощью метода Бокса-Кокса (описан выше) или логарифмированием, что является частным случаем того же метода;
- В случае нестационарности ряда – подбор порядка дифференцирования, при котором ряд становится стационарным. Таким образом, фиксируются параметры  $d, D$  модели SARIMAX;
- Построение графиков автокорреляционной функции (ACF) и частичной автокорреляционной функции (PACF) – это автокорреляция после снятия авторегрессии предыдущего порядка. Например, чтобы подсчитать частичную автокорреляцию с лагом  $\tau = 2$ , требуется построить авторегрессию порядка 1, вычесть эту авторегрессию из ряда и подсчитать автокорреляцию на полученных остатках. Из этих графиков определяются примерные значения параметров  $p, q, P, Q$  моделей. Фактически эти значения — начальные приближения, с которых начинается перебор разных моделей;
- Обучение и сравнение полученных моделей по информационному критерию Акаике:  $AIC = -2 \cdot \ln L + 2k$ , где  $L$  — правдоподобие,  $k = P + Q + p + q + 1$  — число параметров в модели. Наилучшей признается та модель, для которой данный критерий минимален. Минимизация критерия осуществляется методом наименьших квадратов;

- Осуществление анализа остатков получившейся модели с помощью модели ARIMA по аналогичному алгоритму.

### 1. Материалы и методы

Все расчеты выполнялись на языке программирования Python 3.7 с помощью библиотек NumPy v1.10.1, SciPy v0.16.0 и SkLearn v0.19.2. Графическое отображение получаемых зависимостей осуществлялось с помощью библиотеки Matplotlib v2.2.3, загрузка и выгрузка табличных данных осуществлялась с помощью пакета OpenPyXL v2.5.6, построение прогнозных моделей осуществлялось в модуле statsmodels v0.10.1.

Испытания модели проводились в ледовом бассейне НГТУ им. Р.Е. Алексеева (г. Н.Новгород).



Рис. 1. След за моделью в поле битого льда толщиной 10 мм сплоченностью 8 баллов

### 2. Результаты

В качестве примера реализации описанного алгоритма приведены прогнозы временных рядов перемещений точки выпуска троса в забортное пространство и произвольной точки троса.

График колебаний точки выпуска троса приведен на рис. 2. Данный ряд имеет ярко выраженный тренд на возрастание, он нестационарен, в начале и в конце имеет различную дисперсию. С точки зрения прогнозирования такие ряды являются наиболее сложными, на рисунке 3 приведена автокорреляция и частичная автокорреляция данного ряда после преобразования Бокса-Кокса. На рисунках 4 и 5 приведены анализ приближения данных с помощью полученной модели и прогноз, построенный моделью-победителем.

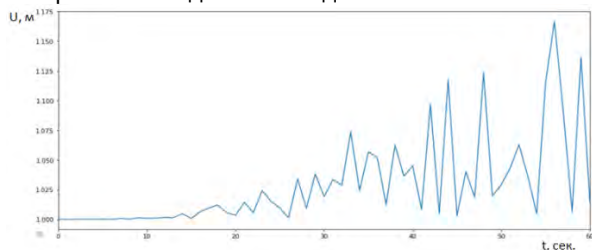


Рис. 2. График колебаний точки выпуска троса.

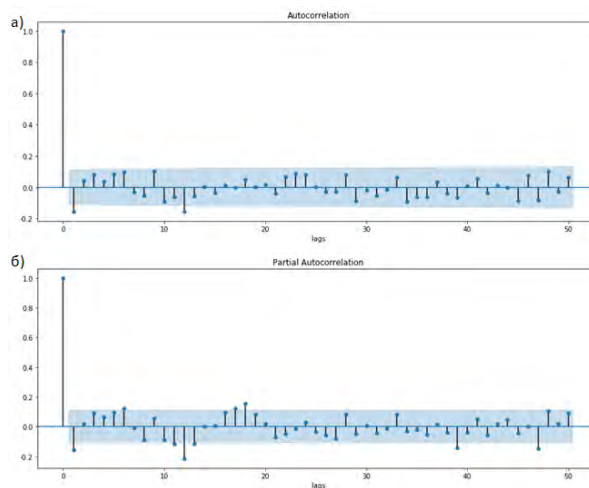


Рис. 3. Автокорреляция (а) и частичная автокорреляция (б) временного ряда колебаний точки выпуска троса.

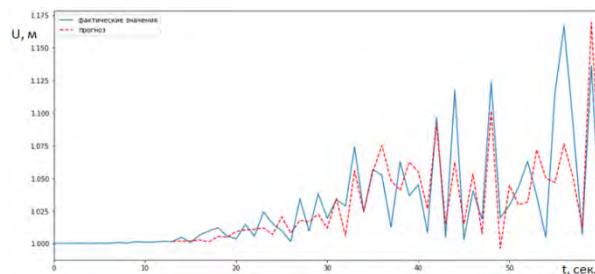


Рис. 4. Анализ приближения данных моделью-победителем (прогноз – красным шрифтом).

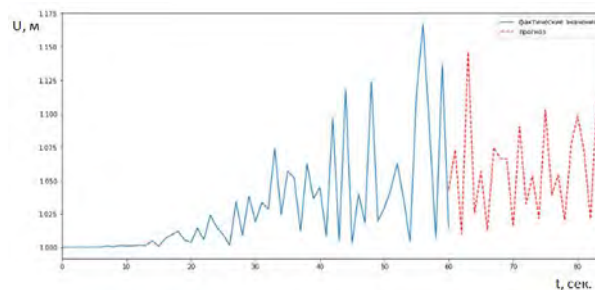


Рис. 5. Прогноз модели-победителя (прогноз – красным шрифтом).

Аналогичные действия были произведены с произвольной точкой троса. График колебаний этой точки приведен на рис. 6. Данный ряд оказался намного лояльней к алгоритму прогнозирования – он не имеет ярко выраженного тренда, он практически стационарен, в начале и в конце имеет примерно одинаковую дисперсию. На рисунках 7 и 8 приведены анализ приближения данных с помощью полученной модели и прогноз, построенный моделью-победителем.

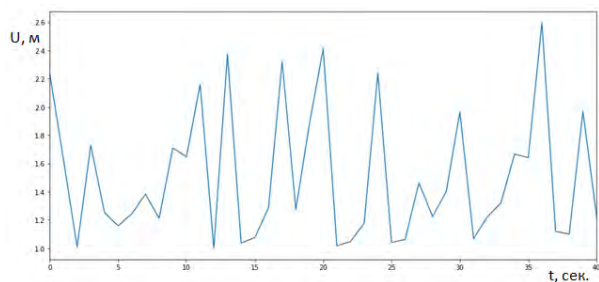


Рис. 6. Колебания произвольной точки троса при установившемся движении судна в ледовом поле.

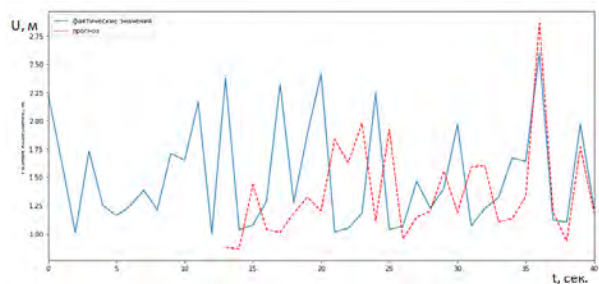


Рис. 7. Анализ приближения данных моделью-победителем (прогноз – красным шрифтом).

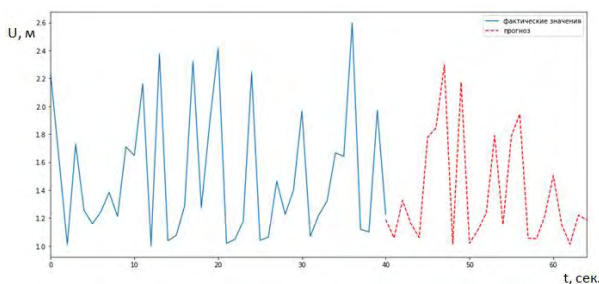


Рис. 8. Прогноз модели-победителя (прогноз – красным шрифтом).

### 3. Выводы

Построенные модели и выданные ими прогнозы достаточно хорошо передают характер колебаний системы. Полученные с их помощью результаты применимы для анализа движения судна с буксируемой аппаратурой во льду. Этот прием значительно расширяет возможности практических методов и технологий моделирования ледовой среды при испытаниях судов [4, 5]. Что, в свою очередь, упрощает задачу проектирования методики проведения подводно-подледной сейсмоакустической разведки с использованием ледокольного судна [6] и разработки специальных технических средств её осуществления [7, 8], которые, безусловно, являются составными частями задачи приоритетного проектирования научно-исследовательских судов ледового плавания [9].

### Заключение

По сведениям авторов, описанный прием прогнозирования временных рядов впервые применяется в отечественном судостроении для моделирования и проектирования судов ледового класса и специального оборудования для осуществления сейсмоакустической разведки в ледовых условиях. Конечной целью исследования является расширение доступных проектантам методов осуществления подобных исследований при проектировании новых и модернизации существующих судов.

### Дополнительная информация

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00207.

### Литература

1. Городецкий Д.О., Зуев В.А., Костылев К.А. К вопросу расчета и конструирования троса для буксировки оборудования судном, движущимся в ледовых условиях // *Фундаментальные и прикладные разработки в области технических и физико-математических наук. Сборник научных статей по итогам работы шестого международного круглого стола.* Казань. 2018. С. 51-56.
2. StatsModels: Statistics in Python – statsmodels v 0.10.1 documentation; Онлайн ресурс, режим доступа: [https://www.statsmodels.org/stable/index.html].
3. В.П. Носко Эконометрика – введение в регрессионный анализ временных рядов. М.: Национальный фонд подготовки кадров, 2002. – 273 с.
4. В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, М.А. Балакшина Разработка практических методов и технологий моделирования ледовой среды при испытаниях судов // 18-я международная конференция по Портовому и Океаническому машиностроению в Арктических условиях. – Потсдам (США), 2005г.
5. В.А. Зуев, Е.М. Грамузов Новые подходы к моделированию ледовой среды при модельных испытаниях судов // «Полярная механика», Владивосток, 2016г.
6. К.А. Костылев, В.А. Зуев Технология сейсморазведки с использованием ледокольного судна // «Труды НГТУ ИМ. Р. Е. Алексеева», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (Нижний Новгород), 2015 г, №1(108), с. 180-190.
7. Костылев К.А. Способ управления сейсмоакустическими косами и устройство позиционирования для его осуществления // Патент RU 2 607 076 C1, МПК G01V1/38 (2006/01), приоритет от 29.09.2015.
8. Сухоруков А. Л. Теория подводных тросовых систем и её инженерные приложения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. — 272 с. + 12 с. цв. вклейка. — ISBN 978-5-9221-1762-3



9. Зувев В.А., Костылев К.А. Приоритетное проектирование научно-исследовательских судов ледового плавания // Полярная механика. 2018. № 4. С. 141-148.

#### References

1. Gorodeckij D.O., Zuev V.A., Kostylev K.A. "K voprosu rascheta i konstruirovaniya trosa dlja buksirovki oborudovanija sudnom, dvizhushhimsja v ledovyh uslovijah". *Fundamental'nye i prikladnye razrabotki v oblasti tehniceskij i fiziko-matematicheskij nauk. Sbornik nauchnyh statej po itogam raboty shestogo mezhdunarodnogo kruglogo stola.* (To the question of calculation and design of a cable for towing equipment by a vessel moving in ice conditions. *Fundamental and applied developments in the field of technical and physical-mathematical Sciences. Collection of scientific articles on the results of the sixth international round table*). Kazan'. 2018. p. 51-56.
2. StatsModels: Statistics in Python – statsmodels v 0.10.1 documentation. Onlajn resurs, rezhim dostupa (Online resource, access mode): [<https://www.statsmodels.org/stable/index.html>].
3. V.P. Nosko Jekonometrika – vvedenie v regressionnyj analiz vremennyh rjadov [Econometrics-introduction to time series regression analysis.]. Nacional'nyj fond podgotovki kadrov [National training Foundation]. Moscow. 2002. – 273 p.
4. V.A. Zuev, E.M. Gramuzov, M.A. Balakshina Razrabotka prakticheskij metodov i tehnologij modelirovanija ledovoj sredy pri ispytaniyah sudov [Development of practical methods and technologies of modeling of ice environment in the test vessels]. "18-ja mezhdunarodnaja konferencija po Portovomu i Okeanicheskomu mashinostroeniju v Arkticheskij uslovijah" [18-th international conference on Port and Ocean engineering in Arctic conditions]. – Potsdam (USA), 2005.
5. V.A. Zuev, E.M. Gramuzov Novye podhody k modelirovaniju ledovoj sredy pri model'nyh ispytaniyah sudov [New approaches to modeling of ice environment in model testing of ships]. «Poljarnaja mehanika» [Polar mechanics], Vladivostok, 2016.
6. K.A. Kostylev, V.A. Zuev Tehnologija sejsmorazvedki s ispol'zovaniem ledokol'nogo sudna [Technology of seismic exploration using icebreaking vessel]. «Trudy NGTU IM. R. E. Alekseeva» [Proceedings of NSTU. R. E. Alekseev], Nizhegorodskij gosudarstvennyj tehniceskij universitet im. R.E. Alekseeva [Nizhny Novgorod state technical University. R. E. Alekseeva] (Nizhnij Novgorod), 2015, №1(108), p. 180-190.
7. Kostylev K.A. Sposob upravljenja sejsmoakusticheskimi kosami i ustrojstvo pozicionirovanija dlja ego osushhestvlenija [Control method of acoustic scythes and positioning device for its realization]. Patent RU 2 607 076 S1, MPK G01V1/38 (2006/01), prioritet ot 29.09.2015 [priority of 29.09.2015].
8. Suhorukov A. L. Teorija podvodnyh trosovyh sistem i ego inzhenernye prilozhenija [Theory of underwater cable systems and its engineering applications]. Moscow. FIZMATLIT, 2017. 272 p. + 12 p. cv. vklejka [color pasting]. ISBN 978-5-9221-1762-3.
9. Zuev V.A., Kostylev K.A. Prioritetnoe proektirovanie nauchno-issledovatel'skij sudov ledovogo plavanija [Priority design of research vessels of ice navigation]. Poljarnaja mehanika [Polar mechanics]. 2018. № 4. p. 141-148.

УДК 629.127

## ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОЧНЫХ КОРПУСОВ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОСТЕКЛОКОМПОЗИТА ДЛЯ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ ГЛУБИНАХ МИРОВОГО ОКЕАНА

**Марина Витальевна Нагаева**

старший преподаватель кафедры «Инженерные дисциплины»  
Дальневосточный государственный рыбохозяйственный университет  
690087, Владивосток, ул. Луговая, 52б  
e-mail: NagaevaMV@mail.ru

**Александр Александрович Ратников**

заведующий лабораторией компьютерного моделирования Инженерной школы  
Дальневосточного федерального университета  
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8  
e-mail: ratnikov.aa@dvfu.ru

**Александр Афанасьевич Карпачев**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой математики  
Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова МО РФ (г. Владивосток)  
690062, Владивосток, Камский переулок, 6  
e-mail: k327063@yandex.ru

**Валерий Эдуардович Осуховский**

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики и общетехнических дисциплин  
Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова МО РФ (г. Владивосток)  
690062, Владивосток, Камский переулок, 6  
e-mail: yul\_shutko@mail.ru

**Владимир Кириллович Гончарук**

доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией оптических материалов  
Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук  
690022, Владивосток, Проспект 100-летия Владивостока, 159  
e-mail: gon@ich.dvo.ru

### Аннотация

В представленной работе рассмотрены особенности изготовления прочных корпусов подводных аппаратов на основе стеклометаллокомпозиата (СМК) для их использования на различных глубинах мирового океана. Показано, что при изготовлении корпусов подводных аппаратов из СМК необходимо решить три задачи: разработать рецептуру стекла, обладающего оптимальными технологическими и механическими свойствами, подобрать сплавы для изготовления металлических слоев, решить проблемы, связанные с соединением стеклянного слоя с металлическими. При изготовлении стеклянного слоя с заданными характеристиками необходимо учитывать следующие свойства стекла: плотность; коэффициент термического расширения, вязкость, температуру стеклования, минимальную температуру заливки стекла и прочность, о которой можно судить по значениям модуля Юнга. Рассмотрены критерии при выборе конструкционного металла для изготовления металлических облицовок СМК, главными из них является способность надежно соединяться со стеклянным слоем в процессе формирования СМК, и надежно сохранять полученное соединение в процессе эксплуатации. Выявлены особенности процессов образования прочного соединения между металлом и стеклом при изготовлении СМК с использованием стекол с различными температурами заливки. Описаны возможности применения тугоплавких стекол при изготовлении корпусов подводных аппаратов до глубин 10000 и более метров. Предельные глубины погружения аппаратов с использованием стекол средней плавкости не более 5000м, легкоплавких до 2000 м.

**Ключевые слова:** стеклометаллокомпозит, глубоководный аппарат, метод центрифугирования, тугоплавкое стекло, диффузионный слой, теоретическая прочность стекла, температура заливки расплава стекла, температура стеклования.

## FEATURES OF THE MANUFACTURE OF DURABLE UNDERWATER HULLS BASED ON METAL-GLASS COMPOSITE FOR THEIR USE AT VARIOUS DEPTHS OF THE OCEANS

**Marina V. Nagaeva**

Senior Lecturer, Department of Engineering disciplines  
The Far Eastern State Technical Fishery University  
Lugovaya, 52b, Vladivostok 690087, Russian Federation  
e-mail: NagaevaMV@mail.ru

**Aleksandr A. Ratnikov**

head of the laboratory of computer modeling of School of Engineering  
Far Eastern Federal University

Sukhanova str., 8, Vladivostok 690950, Russian Federation  
e-mail: ratnikov.aa@dvvu.ru

**Aleksandr A. Karpachev**

doctor of technical sciences, professor

Pacific Higher Naval School named after S.O. Makarov Ministry of Defense of the Russian Federation (Vladivostok)

Kamsky Lane, 6, Vladivostok 690062, Russian Federation

e-mail: k327063@yandex.ru

**Valery E. Osuhovsky**

doctor of physical and mathematical sciences, professor

Pacific Higher Naval School named after S.O. Makarov Ministry of Defense of the Russian Federation (Vladivostok)

Kamsky Lane, 6, Vladivostok 690062, Russian Federation

e-mail: yul\_shutko@mail.ru

**Vladimir K. Goncharuk**

doctor of chemical sciences, professor, head of the optical materials laboratory

Institute of Chemistry of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Stoletiya Vladivostoka avenue, 159, Vladivostok 690022, Russian Federation

e-mail: gon@ich.dvo.ru

### Abstract

In this paper, we consider the features of manufacturing durable underwater hulls based on glass-metal composite (SMC) for their use at various depths of the oceans. It is shown that in the manufacture of submarine hull bodies from SMK it is necessary to solve three problems: develop a glass formulation having optimal technological and mechanical properties, select alloys for the manufacture of metal layers, and solve the problems associated with the connection of a glass layer with metal. In the manufacture of a glass layer with specified characteristics, the following glass properties should first be considered: density; thermal expansion coefficient, viscosity, glass transition temperature, minimum glass pouring temperature and strength, which can be judged by the values of Young's modulus. The criteria are considered when choosing a structural metal for the manufacture of metal claddings, the main ones are its ability to reliably connect to the glass layer during the formation of the QMS, and to reliably maintain the resulting compound during operation. The processes of the formation of a strong joint between metal and glass during the formation of SMC using glasses with different pouring temperatures are considered. The possibilities of using refractory glasses in the manufacture of underwater vehicle bodies to depths of 10,000 and more meters have been identified. The maximum immersion depths of devices using glasses of medium fusibility not more than 5000 m, fusible up to 2000 m.

**Keywords:** glass-metal composite, deep-sea apparatus, centrifugation method, refractory glass, diffusion layer, theoretical strength of glass, glass melt pouring temperature, glass transition temperature.

### Введение

Океаны покрывают более двух третей поверхности нашей планеты, а исследованы всего на 5 %. Физические трудности исследований в таких экстремальных условиях препятствуют современным технологиям изучения океана достижению глубин и раскрытию их тайн. Поэтому важно ускорить внедрение новых высокоэффективных подводных аппаратов с различными глубинами погружения, чтобы повысить скорость и масштабы исследований, необходимых для лучшего понимания самого большого ресурса нашей планеты. В связи с возрастающим спросом на подводные работы разрабатываются новые более совершенные аппараты с увеличенной глубиной погружения вплоть до предельных, появляются новые требования к эксплуатационным качествам аппаратов в части увеличения их автономности, скорости и полезной грузоподъемности. С расширением программы исследований и работ в Мировом океане в различных впадинах и разломах, которые на данный момент практически не исследованы, возникает задача создания аппаратов для работы на глубинах более 7000 м, что требует дальнейшего повышения прочности корпусных материалов. Важное значение также придается применению необитаемых подводных аппаратов различных типов, а также иных

роботизированных комплексов при решении самого широкого спектра задач в интересах военно-морских сил и береговой охраны ведущих стран мира, применяемых на малых и средних глубинах.

Для изготовления прочных корпусов глубоководных аппаратов необходимы материалы с высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью и технологичностью, поэтому их разработка является актуальной задачей. Внедрение новых конструкционных материалов с существенно улучшенными эксплуатационными характеристиками приводит к повышению конкурентоспособности этих средств, улучшению их технических и эксплуатационных характеристик при уменьшении стоимости единиц такой техники и затрат на их обслуживание. Таким материалом может стать стеклометаллокомпозит (СМК). Этот материал впервые был предложен профессором В.В. Пикулем, который математически рассчитал и предложил способы изготовления этого конструкционного материала на основе стекла и металла [1–4], который включает один или несколько слоев стекла, заключенных между слоями металла, и может иметь плоскую или цилиндрическую форму. Прочность стеклометаллокомпозита определяется прочностью стеклянного слоя. Впервые теоретическую прочность (порядка 10 ГПа) рассчитал Гриффитс [5]. В дальнейшем был проведен целый ряд оценок

теоретической прочности стекла различными методами [8]. Приведенные оценочные величины теоретической прочности стекла составляли от 15 до 5 ГПа для стеклянных волокон и объемных образцов. В работах сотружников Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН Витмана Ф.Ф., Пуха В.П., Байковой Л.Г. и др [7] установлено, что прочность стекла не зависит от размеров стеклянного изделия и определяется в основном тремя главными причинами: наличием поверхностных микротрещин, контактом поверхности с влагой и наличием внутренних микродефектов. Наибольшее влияние на прочность стекла оказывают поверхностные микротрещины. Они снижают прочность стеклянных изделий на несколько порядков. По данным их исследований прочность стекла в зависимости от составов и условий получения составляет от 3 до 12 ГПа.

Металлические облицовки в составе стеклометаллокомпозита выполняют две основные функции: устраняют причины, вызывающие поверхностные микротрещины в стеклянном слое в процессе его формирования, и предохраняют стеклянный слой стеклометаллокомпозита от взаимодействия с окружающей средой в процессе эксплуатации. Главным показателем стеклометаллокомпозита, как самостоятельного конструкционного материала, является надежное соединение металлических облицовок со стеклянным слоем с образованием диффузионного слоя металл – стекло [8].

При изготовлении корпусов подводных аппаратов из стеклокомпозита необходимо решить три задачи: разработать рецептуру стекла, обладающего оптимальными технологическими и механическими свойствами, подобрать сплавы для изготовления металлических слоев, решить проблемы, связанные с соединением стеклянного слоя с металлическими слоями.

## 1. Разработка рецептуры стекла

При изготовлении стеклометаллокомпозита для получения заданных характеристик материала необходимо прежде учитывать следующие свойства стекла: плотность; коэффициент термического расширения, вязкость, температуру стеклования, минимальную температуру заливки стекла и прочность, о которой можно судить по значениям модуля Юнга.

Коэффициент термического расширения, температура стеклования и минимальная температура заливки определяют весь процесс формирования стеклянного слоя высокого качества и изготовления стеклометаллокомпозита с конкретными (заданными) свойствами и размерами. Превращение расплавленной стекломассы в изделие заданной конфигурации осуществляется при сочетании текучести стекломассы с её непрерывным твердением, которая характеризуется нарастанием вязкости при охлаждении.

В представленной работе исследования проводили на составах стекол, имеющих различные температуры заливки от 1500 до 900 °С. К ним относятся тугоплавкие стекла составов (масс. %): 58.1SiO<sub>2</sub>-3,3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-4MgO-7,1CaO-13.5Na<sub>2</sub>O-14B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (состав 1), 62.0SiO<sub>2</sub>-5,5Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2,6MgO-6,5CaO-13.6Na<sub>2</sub>O-9,8B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (состав 2); среднеплавкое: 40SiO<sub>2</sub>-10Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-20Na<sub>2</sub>O-40B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (состав 3); низкоплавкое: 15Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-20Na<sub>2</sub>O-60P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-5Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (состав 4).

Тугоплавкие стекла составов 1 и 2 использовались для изготовления композитных материалов типа металл-стекло-металл, прочность которых позволила изготавливать корпуса подводных аппаратов для работы на предельных глубинах мирового океана, среднеплавкие и низкоплавкие стекла – на глубинах до 5000 м.

Таблица 1

Термомеханические и теплофизические характеристики стекол

Состав стекла	Параметры стекла			
	d, г/см <sup>2</sup>	T <sub>зал</sub> °С	КТР×10 <sup>6</sup>	T <sub>g</sub> , °С
58.1SiO <sub>2</sub> -3,3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -4MgO-7,1CaO-13.5Na <sub>2</sub> O-14B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,53	1450	73,4	568±10
62.0SiO <sub>2</sub> -5,5Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -2,6MgO-6,5CaO-13.6Na <sub>2</sub> O-9,8B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,54	1480	74,4	573
40SiO <sub>2</sub> -10Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -20Na <sub>2</sub> O-40B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,51	1100	89,8	500
15Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -20Na <sub>2</sub> O-60P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -5B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,53	900	93,2	470

## 2. Подбор металлов для наружных и внутренних оболочек

Основным критерием при выборе конструкционного металла для металлических облицовок СМК является его способность надежно соединяться со стеклянным слоем в процессе формирования СМК, и надежно сохранять полученное соединение в процессе эксплуатации. Тогда при остывании СМК за счёт разности в коэффициентах температурного расширения металл стянет поверхность стеклянного слоя и обожжет его, вследствие чего будут устранены причины, вызывающие появление поверхностных микротрещин в стекле. Покрытие поверхности стеклянного слоя металлической облицовкой предохраняет его от взаимодействия с окружающей средой. Для соединения

металлических облицовок со стеклянным слоем стеклометаллокомпозита существенное значение имеет химическое средство металла со стеклом, высокая пластичность металла, плотность, динамические характеристики материала (ударная вязкость и выносливость при циклических нагрузках). Кроме того, необходимо учитывать технологию изготовления металла (свариваемость и обрабатываемость), его стоимость и коррозионную стойкость.

Предельная деформация конструкционных металлов на разрыв с повышением прочности уменьшается. Однако вследствие исключительно высокой прочности бездефектного силикатного стекла, прочность металлических облицовок для СМК является второстепенным фактором. Значительно большее значение имеет пластичность металлических облицовок. При

изготовлении подводных аппаратов используют сталь и сплавы алюминия и титана.

Малоуглеродистая сталь обладает высокой пластичностью (предельная деформация при растяжении достигает 40%), технологичностью (хорошая свариваемость и обрабатываемость), низкой стоимостью. Однако, из-за низкого химического сродства с силикатными стеклами, большого веса, низкой коррозионной стойкости и магнитной восприимчивости их применение при изготовлении корпусов подводных аппаратов невозможно. Применение титановых сплавов для этих целей так же проблематично, хотя они обладают высоким химическим сродством с силикатными стеклами, относительной легкостью, достаточной пластичностью (предельная деформация при растяжении достигает 20%), высокой коррозионной стойкостью, немагнитностью. Однако плохая технологичность (трудности со свариваемостью и обрабатываемостью) и высокая стоимость сильно затрудняет их использование.

Для изготовления корпусов были выбраны высоко деформируемые алюминиевые сплавы, поскольку их свойства: легкость (плотность почти втрое ниже, чем у стали), высокая пластичность (предельная деформация при растяжении достигает 30%), технологичность (хорошая свариваемость и обрабатываемость), высокая коррозионная стойкость, немагнитность удовлетворяет всем требованиям к материалам металлических слоев металлокомпозита.

Основным критерием при выборе марки алюминиевого сплава для металлических облицовок цилиндрических оболочек из СМК является пластичность. Предельная деформация силикатного стекла составляет 11%. Для обеспечения надежной эксплуатации цилиндрической оболочки из СМК необходимо, чтобы предельная деформация облицовок из алюминиевых сплавов была бы существенно выше. Из отечественных марок алюминиевых сплавов этому критерию в наибольшей мере соответствуют алюминий и его сплавы АМг-2М, и АМцМ.

### 3. Процесс образования прочного соединения между металлом и стеклом при образовании стеклометаллокомпозита

Проблемы получения прочного соединения (сцепления) при взаимодействии стеклообразующего расплава и твёрдого металла при высоких температурах связаны с двумя стадиями их взаимодействия:

- смачиванием расплава поверхности металла и растеканием расплава по поверхности; химическим взаимодействием компонентов расплава с поверхностью металла (окислительно-восстановительные и обменные реакции по механизму кислотно-основного взаимодействия);

- распространением химического взаимодействия в объём расплава и подложки (диффузия и диффузионно-химическое взаимодействие);

В результате образуется промежуточный слой конечной толщины (сцепляющий слой).

В процессе последующего охлаждения, по мере перехода расплава в твёрдое стеклообразное состояние, в композиционном материале возникают внутренние напряжения, обусловленные различием dilatометрических и механических свойств металла, промежуточного слоя и стекла (технологические напряжения), которые остаются и после достижения комнатной температуры (остаточные напряжения).

Реальная прочность сцепления зависит от всех перечисленных процессов, а также от формы и размеров соединяемых в композиции материалов.

Смачивание – первичный процесс взаимодействия между двумя веществами в конденсированном состоянии, из которых хотя бы одно находится в жидком состоянии. Природа сил, обуславливающих смачивание, может быть весьма разнообразной: ван-дер-ваальсовы силы притяжения, химическая связь (ковалентная, ионная и др.), металлическая связь. В результате вместо двух поверхностей раздела возникает новая поверхность раздела «твёрдая фаза – жидкая фаза» (тж) с межфазной поверхностной энергией, которую называют адгезией.

Растекание – распространение расплава по поверхности твёрдой фазы (подложки, субстрата). В отсутствие других внешних сил движущей силой растекания является избыточная (свободная) межфазная поверхностная энергия. При изготовлении цилиндрической оболочки с использованием центрифуги этот процесс происходит очень быстро. Тормозящей силой течения, действующей во всех случаях, являются вязкие потери в слое расплава и на поверхности раздела. Известно, что вязкость стеклообразующих расплавов экспоненциально повышается с понижением температуры, поэтому понижение температуры резко замедляет процесс растекания, что может ухудшить качество диффузионного слоя металл–стекло.

Применительно к оксидным стеклообразующим расплавам и металлическим подложкам в простейшем случае химическое взаимодействие между ними выражается в возникновении связи  $Me - O - R$ , где  $Me$  – поверхностный атом подложки,  $R$  – катион в структурной сетке стеклообразующего расплава. Связующий атом кислорода –  $O$  – (кислородный мостик) отражает химическую сущность адгезионного взаимодействия. Он может быть либо результатом поверхностной окислительно-восстановительной реакции между расплавом и алюминиевой подложкой (например, при взаимодействии в безокислительной атмосфере), либо окисная плёнка уже существует на металле (например, за счёт взаимодействия с кислородом газовой атмосферы). Компоненты расплава и подложки, а также продукты поверхностных реакций могут распространяться в объём по обе стороны от первоначальной границы раздела фаз. При этом первоначальная граница раздела размывается. Процесс может контролироваться скоростью диффузии или скоростью химических реакций. В общем случае можно говорить о диффузионно-химическом взаимодействии. На это взаимодействие влияют химический состав расплава, металла, его кристаллическая структура, технологические

условия (температура, время, газовая среда расплава. Как правило, наличие катиономодификаторов способствует этому процессу, повышая химическую активность и уменьшая вязкость расплава. Окислительно-восстановительное взаимодействие компонентов расплава и подложки, в том числе с участием диффундирующего через слой расплава кислорода газовой атмосферы. В качестве продуктов реакции могут образовываться оксиды разной валентности металла подложки, твердые растворы кислорода в металле подложки.

Возможны следующие типы реакций между металлической подложкой и стеклообразующим расплавом.

Растворение окисной плёнки металла подложки в расплаве без изменения валентного состояния компонентов и диффузия продуктов реакции в объём соединения элементов расплава и металлической подложки, возможно восстановление оксидов алюминия до металлического состояния. Обозначенные выше процессы часто объединяют термином коррозионная активность расплава по отношению к подложке.

В результате образуется промежуточный слой, свойства которого являются определяющими для прочности сцепления металла со стеклом.

Соединение стеклянного слоя с алюминиевой облицовкой нами выполнено посредством сварки с использованием центрифуги. Были исследованы условия образования диффузионных слоев стекло – алюминий для приведенных в таблице 1 составов стекол.

#### 4. Диффузионный слой на границе «высокоплавкое стекло – алюминий»

Испытания проводили с использованием силикатного стекла составов  $62.0\text{SiO}_2-5.5\text{Al}_2\text{O}_3-2.6\text{MgO}-6.5\text{CaO}-13.6\text{Na}_2\text{O}-9.8\text{B}_2\text{O}_3$  и  $58.1\text{SiO}_2-3.3\text{Al}_2\text{O}_3-4\text{MgO}-7.1\text{CaO}-13.5\text{Na}_2\text{O}-14\text{B}_2\text{O}_3$  и скорости вращения центрифуги 3000 об/мин. Варьированием температуры алюминиевой формы и заливаемого расплава стекла определяли оптимальные режимы формирования прочного сцепления слоев стекла и металла. При низких температурах алюминиевого слоя (ниже  $300^\circ\text{C}$ ) или расплава стекла (ниже  $1450^\circ\text{C}$ ) прочного соединения алюминия со стеклом не происходило. При температурах расплава стекла  $1450-1500^\circ\text{C}$  и температуры алюминиевого слоя около  $400^\circ\text{C}$  формировался прочный диффузионный слой. Однако в пограничной зоне алюминий-стекло отмечалось появление темных пятен, что связано с началом процесса алюмотермии, в результате чего выделяется кремний, резко ухудшающий качество соединения. Температура расплава при заливке  $1450^\circ\text{C}$  и начальная температура алюминиевой формы перед заливкой около  $300^\circ\text{C}$  являются оптимальными условиями изготовления корпуса подводного аппарата. Заливка расплава при температурах  $1500^\circ\text{C}$  и выше увеличивает вероятность алюмотермии. На рисунке 1 приведено сравнение изображений приграничных слоев образцов полученных при температурах заливок  $1450^\circ\text{C}$  и  $1500^\circ\text{C}$ .

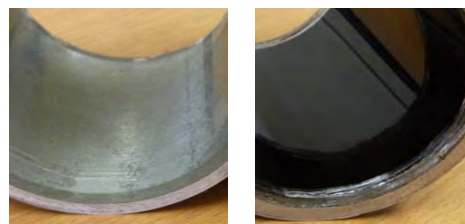


Рис. 1. Вид диффузионных слоев тугоплавкое стекло – алюминий

На правой оболочке видно, что произошла алюмотермия, в результате которой диффузионный слой окрасился в черный цвет. При этом ширина диффузионного слоя алюминий–стекло составляет более 40 микрон, а глубина проникновения основных элементов стекла и алюминия (Si, Al) достигает значений порядка 20–30 микрометров. Величина же диффузионного слоя стекло–алюминий левой оболочки составляет только 6–10 мкм для большинства элементов (Al, Si, Ca, Mg).

#### 5. Диффузионный слой на границе «среднеплавкое стекло – алюминий»

В качестве стекла со средней температурой варки (до  $1300^\circ\text{C}$ ) и температурой заливки около  $1000^\circ\text{C}$  использовано стекло состава  $40\text{SiO}_2-10\text{Al}_2\text{O}_3-20\text{Na}_2\text{O}-40\text{B}_2\text{O}_3$ , которое выплавлялось при температурах  $1200-1250^\circ\text{C}$  и заливалось в алюминиевую форму, вращающуюся со скоростью до 3000 оборотов в минуту.

В результате экспериментов установлено, что при заливке силико-боратных стекол при температурах  $1000-1100^\circ\text{C}$  и использовании форм без подогрева тепловое равновесие наступает при температурах стеклования ( $450-500^\circ\text{C}$ ).

Существенным отличием от высокотемпературных стекол является то, что при скоростях центрифуги 3000 об/мин не происходит разрушения приграничного слоя алюминия. Глубина получаемого диффузионного слоя варьирует от 1,0 мкм до 2,5 мкм. Граница стекло – металл ровная. Для увеличения глубины спаивания температуру алюминиевой формы увеличивали до таких температур, чтобы при остывании расплава силико-боратного стекла тепловое равновесие устанавливалось при  $600^\circ\text{C}$ . Если увеличить температуру формы до  $500^\circ\text{C}$ , то при температурах заливки стекла в  $1000^\circ\text{C}$  можно получить такой же результат, как при заливке высокотемпературного стекла.

#### 6. Диффузионный слой на границе «легкоплавкое стекло – алюминий»

Было изучено сцепление низкоплавкого алюмофосфатного стекла состава  $15\text{Al}_2\text{O}_3-20\text{Na}_2\text{O}-60\text{P}_2\text{O}_5-5\text{Fe}_2\text{O}_3$ , температура плавки которого ниже  $1100^\circ\text{C}$ . Для этого стекла характерен широкий интервал изменения значений температурных коэффициентов линейного расширения, низкие значения температуры стеклования и вязкости, достаточная химическая устойчивость и высокая микротвердость, которые делают их перспективными для получения СМК. Кроме того, это стекло обладает высокой стойкостью к кристаллизации, что позволяет

проводить ступенчатый подъем и снижение температур, исключая возникновение опасных напряжений в спае алюминий–стекло.

Выявлено, что интенсивное взаимодействие легкоплавкого стекла с алюминием происходит при температурах от 800°C до 900°C при вязкости расплава стекла 2–3 Па·с, а диффузионные процессы на границе раздела стекло–алюминий обусловлены интенсивными передвижениями компонентов стекла. Рентгенофазовым анализом показано, что взаимодействие при смачивании алюминия стеклом не приводит к образованию новых кристаллических фаз в переходном слое.

Исследованием физического состояния приграничной зоны стекло–алюминий с помощью сканирующего микроскопа выявлено образование диффузионного слоя толщиной 2–3 мкм вследствие изменения распределения атомов алюминия в поверхностной зоне стекла.

Легкоплавкие стекла, отличающиеся высокими значениями ТКЛР и диэлектрических характеристик и низкой температурой стеклования, можно синтезировать на основе стекол алюмофосфатной и борофосфатной систем, содержащей до 30 мол. % фторидов

## Заключение

В представленной работе рассмотрены особенности изготовления прочных корпусов подводных аппаратов на основе металлокерамики для их использования на различных глубинах мирового океана. Показано, что при изготовлении корпусов подводных аппаратов из стеклокерамики необходимо решить три задачи: разработать рецептуру стекла, обладающего оптимальными технологическими и механическими свойствами, подобрать сплавы для изготовления металлических слоев, решить проблемы, связанные с соединением стеклянного слоя с металлическими.

Рассмотрены процессы образования прочного соединения между металлом и стеклом при образовании стеклокерамики с использованием стекол с различными температурами заливки. Выявлены возможности применения тугоплавких стекол при изготовлении корпусов подводных аппаратов до глубин 10000 и более метров. Предельные глубины погружения аппаратов с использованием стекол средней плавкости не более 5000 м, легкоплавких до 2000 м.

## Литература

1. Патент РФ № 2067060. Способ изготовления оболочки прочного корпуса подводного аппарата / В.В. Пикуль. – 27.09.96. Бюл. № 27.
2. Пикуль В.В. К созданию композиционного наноматериала на базе стекла // Перспективные материалы. – 2008. – № 3. – С. 78–83.
3. Пикуль В.В. Методика проектирования и расчета прочного корпуса подводного аппарата. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 66 с.
4. Pikul, V.V., Goncharuk, V.K., Maslennikova, I.G. A Cylindrical Shell Made of Glass-Metal Composite // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 756. – P. 230–235.
5. Griffith, A.A. The phenomena of rupture and flow in solids // Phys. Trans. Roy. Soc. – 1920. – Ser. A. – Vol. 221. – P. 163–198.
6. Байкова Л.Г., Песина Т.И., Kurkjian C.R., Tang Zh., Киреенко М.Ф., Тихонова Л.В., Пух В.П. О методике определения истинной прочности неорганических стекол // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – Вып. 10. – С. 55–60.
7. Пух В.П., Байкова Л.Г., Киреенко М.Ф. [и др.]. Прочность неорганических стекол в связи с их атомной структурой // XV Петербургские чтения по проблемам прочности. – Санкт-Петербург, 2005. – С. 7–9.
8. Гончарук В.К., Антоненко С.В., Бочарова А.А., Ратников А.А. Создание стеклокерамических оболочек для прочных корпусов глубоководных аппаратов // Научный журнал «Морские интеллектуальные технологии». – Санкт-Петербург, 2018. – № 3 (41). – Т.1. – С. 76–83.

## References

1. Patent RF na izobreteniyе № 2067060. Sposob izgotovleniya obolochki prochnogo korpusa podvodnogo apparata. Pikul, V.V. 27.09.96. Bul. № 27.
2. Pikul, V.V. (2008). K sozdaniyu kompozitsionnogo nanomateriala na baze stekla. Perspektivnye materialy, 3, 78–83.
3. Pikul V.V. Metodika proyektirovaniya i raschota prochnogo korpusa podvodnogo apparata. Vladivostok, Dal'nauka, 2011. 66 p.
4. Pikul, V.V., Goncharuk, V.K., Maslennikova, I.G. (2015). A Cylindrical Shell Made of Glass-Metal Composite. Applied Mechanics and Materials, Vol. 756, 230–235.
5. Griffith, A.A. (1920) The phenomena of rupture and flow in solids. Phys. Trans. Roy. Soc., Ser. A., Vol. 221, 163–198.
6. Bayikova, L.G., Pesina, T.I., Kurkjian, C.R. & dr. (2013). O metodike opredeleniya istinnoy prochnosti neorganicheskikh stekol. Gurnal tehnicheckoi fiziki. T. 83, vyp. 10, 55–60.
7. Pukh, V.P., Bayikova, L.G., Kireenko, M.F. & dr. (2005). Prochnost neorganicheskikh stekol v svyazi s ikh atomnoy strukturoy. XV Peterburgskie chteniya po problemam prochnosti. Sankt Peterburg, P.7–9.
8. Goncharuk, V.K., Antonenko, C.V., Bocharova, A.A., Ratnikov, A.A. (2018). Sozdaniye steklometallokompozitnih cilindricheskikh obolochek dlyi prochnih korpusov glubokovodnih apparatov. Morskie intellektual'ny'e tekhnologii, 3 (41), T.1, 76–83.

УДК 629.5.062.13

## ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТИВОАВАРИЙНЫХ АЛГОРИТМОВ АМФИБИЙНЫХ СУДОВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

**Валерий Юрьевич Каминский**

кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией  
Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук  
199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13  
тел.: (812) 321-95-68, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

**Дмитрий Алексеевич Скороходов**

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник  
Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук  
199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13  
тел. 8(812) 323-29-54, e-mail: info@iptran.ru

профессор кафедры

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»),  
197376, Россия, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, 5  
тел. +7(921) 884-17-16, e-mail: skorohodda@mail.ru

**Сергей Николаевич Турусов**

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

**Александр Валентинович Федоров**

доктор технических наук, старший преподаватель факультета пищевой биотехнологии и инженерии  
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики  
и оптики (Университет ИТМО)  
191002, Россия, Санкт-Петербург, улица Ломоносова, 9  
Тел.+7(981) 106-90-78, e-mail: afedorov@itmo.ru

### Аннотация

Приведена классификация аварий судов на воздушной подушке. Показано, что причины аварий могут быть сведены в четыре группы: навигационные, неисправности корпуса судна и технических средств, ошибочные действия экипажа, пожары и взрывы. Проанализированы особенности обеспечения живучести СВП в различных аварийных ситуациях. Предлагается разграничить принципы и средства обеспечения живучести судна, реализовав различный подход к автоматизации движения судна и поддержанию функционирования технических средств. Определены параметры судна, характеризующие предаварийную ситуацию. Предложены возможные противоаварийные алгоритмы для различных аварийных сценариев: разрушение винта изменяемого шага одного борта судна, разрыв гибкого ограждения, отказ газотурбинного двигателя одного из бортов, возникновение большого момента рыскания. Развитие аварийных ситуаций, вызванных отказами технических средств, характеризуется малыми значениями постоянных времени, что исключает возможность принятия решения оператором, но позволяет выполнить необходимые противоаварийные мероприятия в автоматическом режиме. При этом идентификацию аварийной ситуации целесообразно проводить путём обработки информации о состоянии технических средств, исполнительных органов, органов управления и источников информации. Диагностирование аварийной ситуации по параметрам движения судна целесообразно в качестве резервного мероприятия при выходе из строя канала, оценивающего состояние технических средств движения, а также при наличии критических внешних ветроволновых возмущений.

**Ключевые слова:** судно на воздушной подушке, авария, живучесть, предаварийная ситуация, противоаварийный алгоритм, диагностика.

## PRINCIPLES OF FORMATION OF ANTI-ACCIDENT ALGORITHMS OF AMPHIBIOUS HOVERCRAFTS

**Valery Y. Kaminsky**

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Laboratory of the Institute of Transport Problems named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences  
12 line, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation  
line, 13 tel. : +7 (812) 321-95-68, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

**Dmitry A. Skorokhodov**

Dr.Sci.Tech, Professor of

the Institute of Transport Problems named after N.S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences



12 line, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation  
tel: 8 (812) 323-29-54, e-mail: info@iptran.ru

Professor of the Department of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin) (St. Petersburg Electrotechnical University "LETI"),

5, Professora Popova street, St. Petersburg, 197376, Russian Federation  
Tel: +7(921) 884-17-16, e-mail: skorhodda@mail.ru

**Sergey N. Turusov**

Doctor of technical sciences, Professor,  
General Director of JSC all-Russian scientific research design and Technology Institute of electrical engineering (VNITI EM)

Blagodatnaya str., 2, St. Petersburg, 196105, Russian Federation  
tel: 8 (812) 369-93-61 e-mail: office@vnitiem.ru

**Alexandr V. Fedorov**

Doctor of Engineering Sciences, senior lecturer of faculty of food biotechnology and engineering  
Saint Petersburg National Research University of Information Technologies,  
Mechanics and Optics (ITMO University)

9, Lomonosova str., Saint-Petersburg, 191002, Russian Federation  
tel: +7(981) 106-90-78, e-mail: afedorov@itmo.ru

**Abstract**

Classification of accidents hovercrafts. It is shown that the causes of accidents can be reduced to four groups: navigation, hull faults and technical means, erroneous actions of the crew, fires and explosions. Features of ensuring survivability of SVP in various emergency situations are analyzed. It is proposed to distinguish the principles and means of ensuring the survivability of the vessel, implementing a different approach to the automation of the vessel and the maintenance of technical means. The parameters of the vessel characterizing the pre-emergency situation are defined. Possible anti-accident algorithms for various emergency scenarios are proposed: the destruction of the variable pitch screw on one side of the vessel, the rupture of the flexible fence, the failure of the gas turbine engine on one side, the occurrence of a large yaw moment. The development of emergency situations caused by failures of technical means is characterized by small values of time constants, which excludes the possibility of making a decision by the operator, but allows you to perform the necessary emergency measures in automatic mode. Thus identification of an emergency is expedient to carry out by processing of information on a condition of technical means, Executive bodies, governing bodies and sources of information. Diagnosing an emergency situation by the parameters of the vessel's motion is advisable as a backup measure in case of failure of the channel assessing the state of the technical means of movement, as well as in the presence of critical external wind-wave disturbances.

**Keywords:** hovercraft, accident, survivability, pre-emergency situation, emergency algorithm, diagnostics.

**Введение**

Анализ аварийных ситуаций судов на воздушной подушке (СВП) [1, 2] показывает, что по тяжести последствий (степени аварийности) можно выделить три группы аварий:

- приводящие к опрокидыванию и гибели судна – 36,5 % общего числа аварий СВП;
- приводящие к выводу судна из действия – 63,5% аварий СВП;
- приводящие к снижению эффективности использования судна.

Данные по авариям, приводящим к снижению эффективности использования судна, отсутствуют. Исходя из опыта эксплуатации отечественных СВП, можно предположить, что подобных случаев значительно больше, чем общее число аварий, связанных с выводом из строя и гибелью судов.

Для решения проблемы безаварийной эксплуатации судов на воздушной подушке необходимо классифицировать причины аварий, характер и динамику развития аварийных ситуаций, и их последствия.

Аварии СВП существенно отличаются от аварий водоизмещающих судов, анализ которых не может служить основанием решения вопросов безаварийной эксплуатации СВП.

Изучение отечественного и зарубежного опыта эксплуатации СВП позволяет свести причины всех аварийных ситуаций в четыре группы [3]:

- 1 – навигационные;
- 2 - неисправности и повреждения корпуса судна и технических средств;
- 3 - ошибочные действия личного состава;
- 4 - пожары и взрывы.

- К группе 1 относятся:
- гидрографические особенности, навигационное обеспечение и загрузка трассы движения;
  - гидрометеорологические условия плавания;
  - загрязнённость маршрута плавающими предметами и ледовая обстановка.

Значительное число навигационных аварий связано с опрокидыванием судна – 27,8% от общего числа аварий (4,25% - с гибелью людей).

- К группе 2 относятся:
- недостаточный запас остойчивости и устойчивости движения судна на курсе;
  - низкая мореходность и управляемость;
  - выход из строя главных двигателей;
  - разрушение или потеря одного из движителей;
  - отказы навигационного комплекса;
  - отказы систем управления движением и техническими средствами.

Около 13,7% аварий произошло по указанным причинам. На отечественных судах этот процент аварий в 2-3 раза выше вследствие низкой надёжности поставляемого на суда оборудования. При этом неисправности технических средств не приводили к гибели судов, а выводили их из строя на различные сроки в зависимости от масштабов повреждений.

Главными причинами неправильных действий (ошибок) операторов являются [4]:

- недостаточная подготовленность экипажа к эксплуатации СВП и технических средств, в частности, незнание их динамических особенностей, характера взаимодействия с окружающей средой и предельных возможностей применения;
- недостоверный контроль состояния технических средств, а также нерегулярный характер его проведения;
- утомлённость экипажа, особенно при движении в штормовых условиях;
- стрессовые ситуации.

Ошибки персонала практически не поддаются статистическому анализу, поскольку скрыты в неисправностях и повреждениях технических средств и возникших, в силу этого, аварийных ситуациях. Однако, по мнению экспертов, неадекватные действия личного состава являются одной из главных причин аварий технических средств и, в целом, судна.

Пожары и взрывы для СВП особенно опасны, т.к. чаще всего приводят к гибели людей и (или) наносят значительный материальный ущерб. Анализ зарегистрированных случаев пожаров и взрывов показывает, что они составляют 6,7% от общего числа аварий.

Обеспечение живучести СВП специфично, поскольку суда реализуют два режима движения: водоизмещающий режим и движение на подушке. Необходимо разделить принципы обеспечения живучести, осуществив различный подход к автоматизации, как движения судна, так и функционирования технических средств.

Анализ результатов исследований аварийных ситуаций при эксплуатации опытных судов на воздушной подушке, самоходных моделей, а также в ходе численных экспериментов [5-8] позволяет установить параметры СВП, характеризующие предаварийную ситуацию.

В рамках проведённого анализа использованы обозначения:  $\psi_0 = \{\dot{\psi} dt < 0\}$  - медленное увеличение дифферента на нос;  $\psi_1 = \{\dot{\psi} \geq 1^\circ/c\}$  - быстрое увеличение дифферента на нос;  $v_0 = \{\dot{v} \geq 0,8 - 1,0g\}$  -

быстрое торможение СВП;  $\varphi_0 = \{\dot{\varphi} \geq 6^\circ/c\}$  -

критическая угловая скорость поворота;  $\theta_0 = \{\dot{\theta} \geq 15^\circ/c\}$  - критическая угловая скорость изменения крена;  $\beta_0 = \{\beta > 20^\circ: Fr \geq 1,2\}$  - критический угол дрейфа;  $\theta_1 = \{\dot{\theta} dt < -1^\circ\}$  - критический угол крена;  $\alpha_0 = \{\alpha_{1(2)}: \alpha_{2(1)} \wedge Fr \geq 1,2\}$  - самопроизвольный сброс шага винта изменяемого шага (ВИШ) или обрыв лопастей;  $\Pi_0 = \{\Pi_{1(2)}: \Pi_{2(1)} \wedge Fr \geq 1,2\}$  - остановка одного из бортовых вентиляторных двигателей;  $\delta_0 = \{\delta_{1,2} stop: Fr >> 1,2\}$  - заклинивание аэрорулей;  $S_0 = \{S_{H1}: Fr \geq 1,2\}$  - открытие носовых струйных рулей;  $g_0 = \{g_0: Fr \geq 1,2\}$  - разрыв гибкого ограждения;  $V_1 = \{V: Fr \geq 1,2\}$  - скорость СВП выше «горбовой»;  $\delta_{stop} = \{\pm \delta_{max}: V_1\}$  - заклинивание аэроруля на «загорбовой» скорости;  $A_0$  - включено автоматическое управление аэрорулями;  $A_1$  - включен канал противоаварийного управления;  $\varphi_1 = \{\dot{\varphi} = 0\}$  - отсутствие угловой скорости разворота СВП;  $v_2 = \{v: Fr < 1,2\}$  - скорость СВП меньше «горбовой»;  $\alpha_1$  - рассогласование по шагу ВИШ равно нулю;  $\alpha_2$  - рассогласование по шагу ВИШ не равно нулю;  $Fr$  - число Фруда.

Рассмотрим возможные противоаварийные алгоритмы в различных ситуациях, идентифицировав их в соответствии с принятыми обозначениями. Учтём, что не только подлом гибкого ограждения опасен для судна, но и его внезапный самопроизвольный уход с курса, который может привести к столкновению с судами, идущими параллельным курсом.

### 1. Перекладка аэрорулей на борт

$$\alpha_0 = \{\alpha_{1(2)}: \alpha_{2(1)} \wedge Fr \geq 1,2\}$$

Перекладка аэрорулей на борт создает момент, достаточный или близкий к таковому, для компенсации момента рыскания -  $M_z$ , возникающего при разрушении (сбросе) ВИШ одного борта. Следовательно, в данной ситуации необходимо обеспечить перекладку аэрорулей на борт с одновременным снижением шага исправного ВИШ. При этом СВП не должен иметь угол дрейфа более  $20^\circ$  и крена более  $10^\circ$ . Необходимо также учесть, что при реализации режима «автоматическое управление» аэрорулями, система управления движением обеспечивает перекладку аэрорулей на борт при отклонении судна от курса и поэтому достаточно лишь снизить шаг исправного ВИШ. Противоаварийный алгоритм будет иметь следующий вид:

$$\sigma_{\alpha_0} \left( (K_{\delta}^{CY}(p) \cdot \delta_{зад} + sign \delta \cdot K_{\delta}^{A1}(p) \cdot \dot{\varphi}) \vee (K_{\delta}^{DY}(p) \cdot \delta + sign \delta \cdot K_{\delta}^{A1}(p) \cdot \dot{\varphi}) \vee K_{\varphi}^{AY}(p) \cdot \varphi \right) \wedge (K_{\alpha}(p) \cdot \alpha_3 + sign \delta \cdot K_{\alpha}^{A1}(p) \cdot \alpha) : \varphi_0 \vee (v_1 \wedge \alpha_0) \vee (v_1 \wedge (\varphi_0 \vee \alpha_0)) \vee (v_1 \wedge \beta_0 \wedge v_0) \vee (v_1 \wedge \psi_1 \wedge v_0)$$

где:  $K_{\delta}^{CY}(p)$  - оператор преобразования сигналов в режиме следящего управления аэрорулями;  $K_{\delta}^{DY}(p)$  - оператор преобразования сигналов в режиме

дистанционного управления;  $K_{\varphi}^{AY}(p)$  - оператор преобразования сигналов в режиме автоматического управления;  $K_{\delta}^{A1}(p)$  - оператор преобразования противоаварийного сигнала

управления;  $K_{\phi}^{AY}(p) = K_{\phi} + K_{\phi}p + K_f \frac{1}{p}$  -

оператор преобразования сигналов в режиме автоматического управления;  $K_{\alpha}(p) = K_{\alpha}$  - оператор преобразования сигналов управления шагом ВИШ.

Условие –

$$(v_1 \wedge \varphi_0) \vee (v_1 \wedge \alpha_0) \vee (v_1 \wedge (\varphi_0 \vee \alpha_0))$$

позволяет, для определения предаварийного состояния судна, выполнять обработку информации тремя способами:

– по изменению параметров движения судна -  $(v_1 \wedge \varphi_0)$ ;

– по состоянию ВИШ -  $(v_1 \wedge \alpha_0)$ ;

– по состоянию ВИШ и по изменению параметров движения -  $(v_1 \wedge (\varphi_0 \vee \alpha_0))$ .

Предпочтителен третий способ, так как он лишён недостатков первых двух: неиспользование постоянной времени, определяемой динамикой судна и функционированием технических средств и

$$\sigma_{g0} = (((K_{\delta}^{CY}(p) \cdot \delta_{зад} + sign\dot{\varphi} \cdot K_{\delta}^{g0}(p) \cdot \dot{\varphi}) \vee (K_{\delta}^{DY}(p) \cdot \delta + sign\dot{\varphi} \cdot K_{\delta}^{g0}(p) \cdot \dot{\varphi}) \vee K_{\phi}^{AY}(p) \cdot \varphi) \wedge (K_{\alpha}(p) \cdot \alpha_3 + sign\dot{\varphi} \cdot K_{\alpha}^{g0}(p) \cdot \alpha) \wedge (K_n(p) \cdot n + sign\theta \cdot K_n^{g0}(p) \cdot n)) : ((v_1 \wedge \theta_1 \wedge \varphi_0) \vee (v_1 \wedge \psi_1 \wedge \beta_0) \vee (v_1 \wedge v_0 \wedge \beta))$$

Очевидно, подобная авария характеризуется исключительно параметрами движения судна и может быть идентифицирована только в результате постоянной обработки информации.

### 3. Отказ газотурбинного двигателя $n0=\{n1(2)0:n2(1)1\wedge v1\}$

Отказ газотурбинного двигателя одного борта характеризуется постоянной времени развития аварии (5 - 10 с), которая определяется динамикой главного двигателя, нагнетательного (вентиляторного) комплекса и судна. Параметром, с постоянной времени 10с, определяющим поддержание воздушной подушки и, следовательно, возникновение крена и самопроизвольного разворота СВП, является частота вращения турбины винта. Данный параметр и определяет постоянную времени

$$\sigma_{n0} = (((K_{\delta}^{CY}(p) \cdot \delta_{зад} + sign\dot{\varphi} \cdot K_{\delta}^{g0}(p) \cdot \dot{\varphi}) \vee (K_{\delta}^{DY}(p) \cdot \delta + sign\dot{\varphi} \cdot K_{\delta}^{g0}(p) \cdot \dot{\varphi}) \vee K_{\phi}^{n0}(p) \cdot \varphi) \wedge (K_{\alpha}(p) \cdot \alpha_3 + sign\dot{\varphi} \cdot K_{\alpha}^{n0}(p) \cdot \alpha) \wedge (K_n(p) \cdot n + sign\theta \cdot K_n^{n0}(p) \cdot n)) : ((v_1 \wedge n_0) \vee (v_1 \wedge \theta_1 \wedge (\varphi_0 \vee \beta_0)) \vee (v_1 \wedge v_0 \wedge \beta_0))$$

Условие: -  $(v_1 \wedge n_0) \vee (v_1 \wedge \theta_1 \wedge (\varphi_0 \vee \beta_0))$

позволяет формировать канал обработки информации тремя способами:

–  $n_0$  – по контролю за состоянием главных двигателей;

–  $v_1 \wedge \theta_1 \wedge (\varphi_0 \vee \beta_0)$  - по контролю параметров движения;

возможность выхода из строя информационного канала состояния технических средств (ВИШ).

### 2. Разрыв гибкого ограждения $g0=\{g0:(v>vr)\}$

При разрыве гибкого ограждения по одному из бортов характерно быстрое увеличение крена, угловой скорости разворота и резкий сброс скорости движения, по моменту времени, совпадающему с ростом угловой скорости разворота. Поэтому алгоритм управления должен предполагать уменьшение угловой скорости разворота, а затем и остановку СВП. Угловая скорость изменения крена является характерным параметром только для тихой воды. При движении СВП на взволнованной поверхности угловая скорость изменения крена может сгенерировать ложную информацию о наличии аварии, поэтому существующий противоаварийный алгоритм управления по второй производной угла крена неприемлем. Для рассматриваемой ситуации информативным является математическое ожидание угла крена.

Предлагается следующий противоаварийный алгоритм:

комплекса: двигатель-нагнетатель-судно.

Для предупреждения развития аварии целесообразно осуществлять автоматическую обработку информации о состоянии главного двигателя и систем его обслуживающих, с оповещением оператора о виде неисправности двигателя, либо выполнять предикторную или директорную обработку информации в зависимости от тяжести аварии, связанной с неисправностью технических средств [9].

Развитие аварийной ситуации оценивается по величинам угловой скорости разворота, угла дрейфа и крена. При этом, угловая скорость изменения крена не является характерной величиной при движении СВП на взволнованном море.

Для подобной ситуации противоаварийный алгоритм управления будет иметь следующий вид:

-  $(v_1 \wedge n_0) \vee (v_1 \wedge \theta_1 \wedge (\varphi_0 \vee \beta_0))$  - по

контролю и параметров движения и состояния главного двигателя с системами обслуживания.

### 4. Заклинивание азроулей $\delta 0=\{\pm\delta\max:v1\}$

Особенностью данного аварийного сценария является возникновение большого момента рыскания СВП, для компенсации которого нет достаточно эффективных и быстродействующих

технических средств. Заклинивание аэрорулей - довольно часто встречающаяся неисправность, возникающая как по причине выхода из строя гидропривода, так и при обрыве обратной связи

$$\sigma_{\delta 0} = (K_{\alpha}(p) \cdot \alpha_{\text{зад}} + \text{sign} \dot{\varphi} \cdot K_{\alpha}^{\delta 0}(p) \cdot \alpha) : ((\delta_0 \wedge v_1) \vee (\varphi_0 \wedge v_1) \vee (\varphi_0 \wedge v_1 \wedge \beta_0) \vee (v_1 \wedge \varphi_0 \wedge v_0)).$$

Составим матрицы условий включения противоаварийных каналов управления:

$$K = \begin{pmatrix} \alpha_0 \wedge v_1 \\ 0 \\ n_0 \wedge v_1 \\ \delta_0 \wedge v_1 \end{pmatrix}; \quad \Phi = \begin{pmatrix} \varphi_0 \wedge v_1 \\ \varphi_0 \wedge v_1 \\ \varphi_0 \wedge v_1 \\ \varphi_0 \wedge v_1 \end{pmatrix};$$

$$H = \begin{pmatrix} (v_0 \wedge \beta_0 \wedge v_1) \vee (v_0 \wedge \psi_1 \wedge v_1) \\ v_0 \wedge \beta_0 \wedge v_1 \\ v_0 \wedge \beta_0 \wedge v_1 \\ v_0 \wedge \beta_0 \wedge v_1 \end{pmatrix};$$

канала управления аэрорулем.

Противоаварийный алгоритм в этом случае будет таким:

$$P = \begin{pmatrix} \psi_1 \wedge v_0 \wedge v_1 \\ \psi_1 \wedge \beta_0 \wedge v_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad X = \begin{pmatrix} 0 \\ \theta_1 \wedge \varphi_0 \wedge v_1 \\ \theta_1 \wedge (\varphi_0 \vee \beta_0) \wedge v_1 \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$\Omega = \begin{pmatrix} \sigma_{\alpha 0} \\ \sigma_{g 0} \\ \sigma_{n 0} \\ \sigma_{\delta 0} \end{pmatrix}; \quad \Omega : K + \Phi + H + P + X.$$

Обобщенное уравнение оценки предаварийной ситуации будет таким:

$$\omega = \left( (\alpha_0 \vee n_0 \vee \delta) \wedge v_1 \right) \vee \left( (v_0 \wedge \beta_0) \vee \varphi_0 \vee (\psi_1 \wedge \beta_0) \vee (\theta_1 \wedge \varphi_0) \right)$$

Обработка информации осуществляется по двум направлениям: оценка состояния технических средств и оценка параметров движения. Подобная структура обеспечивает диагностику предаварийной ситуации, но не может служить основой для выполнения противоаварийных мероприятий, т.к. не обеспечивает выбор технических средств для предотвращения аварии.

Необходимо обеспечить оценку состояния технических средств в следующем виде:

$$\omega_1 = (\alpha_0 \wedge v_1) \vee (n_0 \wedge v_1) \vee (\delta_0 \wedge v_1).$$

Выбор алгоритма управления техническими средствами при выходе за допустимые пределы параметров движения судна, достигается при выявлении величины и знака контролируемого параметра. При этом система будет одинаково реагировать на недопустимые параметры движения, вызванные внешними воздействиями (неисправности корпуса, юбки, чрезмерные ветроволновые возмущения) и обусловленные внутренними причинами (отказы технических средств, ошибочные действия оператора) [10]. Причём система управляет всеми техническими средствами независимо от их текущего состояния и обеспечивает выборку информации для управления техническими средствами в определенной последовательности, в зависимости от динамики судна и состояния технических средств в соответствии со следующим алгоритмом:

$$\omega_2 = (v_0 \wedge v_1 \wedge \beta_0) \vee (v_1 \wedge \varphi_0) \vee (\varphi_0 \wedge \psi_1 \wedge \theta_1)$$

Для отслеживания параметров  $v_0, \beta_0, \varphi_0, \psi_1, \theta_1, v_1$  сложных вычислений не требуется, но, как и для вычислений  $\alpha_0, n_0$  и  $\delta_0$ , необходимо обеспечить выполнение некоторых логических условий:

$$\left\{ \exists \alpha_0 \forall \alpha : (\alpha_{\text{зад}} \text{ const}) \wedge \left( \frac{d\alpha_{\text{ист}}}{dt} < 0 \right) \right\}$$

$$\left\{ \exists n_0 \forall n : (n_{\text{зад}} \text{ const}) \wedge \left( \frac{dn_{\text{ист}}}{dt} < 0 \right) \right\}$$

$$\left\{ \exists \delta_0 \forall \delta : (\delta_{\text{ист}} \text{ const}) \wedge (\delta_{\text{зад}} \text{ var}) \right\}$$

Актуальная информация создаёт резерв времени для выполнения противоаварийных мероприятий, исключающих выход из строя судна. В остальных случаях, как и при отказе данного канала, будет функционировать канал директорной обработки информации по параметрам движения судна [11], дублируя канал директорного управления по состоянию технических средств.

### Заключение

1. Аварийные ситуации на СВП показывают необходимость противоаварийных мероприятий, исключающих гибель судна и обеспечивающих безопасность в основном режиме движения. Аварийные ситуации на СВП связаны с ошибками операторов, неисправностью технических средств и выходом из строя систем управления.

2. Развитие аварийной ситуации, связанной с отказом технических средств, характеризуется малыми значениями постоянной времени, что исключает возможность принятия решения оператором, но позволяет выполнить необходимые противоаварийные мероприятия в автоматическом режиме. При этом идентификацию аварийной ситуации целесообразно проводить путём обработки информации о состоянии технических средств, исполнительных органов, органов управления и источников информации.

3. Диагностирование аварийной ситуации по параметрам движения судна целесообразно в качестве резервного мероприятия при выходе из строя канала, оценивающего состояние технических средств движения, а также при наличии критических внешних ветроволновых возмущений.

4. Наличие внешнего крена и отрицательного дифферента СВП способствует затягиванию гибкого ограждения с последующим его подломом и вызывает уменьшение поперечной остойчивости и продольного восстанавливающего момента. Граница устойчивости формы у гибкого ограждения является одновременно и границей устойчивости СВП, переход через которую приводит к опрокидыванию судна.

5. Деформация гибкого ограждения СВП с ростом дрейфа и при наличии положительного крена приводит к потере площади воздушной подушки и смещению зоны давления гидродинамических сил к центру тяжести корабля, следствием чего является падение восстанавливающего момента от воздушной подушки и затягивание гибкого ограждения под корпус с дальнейшим его подломом и возможным опрокидыванием СВП.

6. При разрушении винта с изменяемым шагом, движущегося на «загорбовых» скоростях СВП, параметром, влияющим на развитие аварии, является скорость рыскания  $\dot{\Phi}$ . При этом движение СВП с курсовым углом к волне (КУВ) = 0° значительно увеличивает скорость развития аварии. Перекладка аэроулей на борт, противоположный разрушенному ВИШ, создает момент, достаточный или близкий к таковому в зависимости от КУВ, для компенсации момента рыскания. Это определяет необходимость движения СВП на «загорбовых» скоростях в режиме автоматической стабилизации курсового угла.

7. При движении СВП на «загорбовых» скоростях максимальный угол перекладки аэроулей должен ограничиваться скоростью хода,

для исключения опасной угловой скорости рыскания в режиме стабилизации судна по курсу или путевому углу.

8. Разрыв бортового гибкого ограждения СВП характеризуется быстрым изменением дифферента на нос, крена, угловой скорости рыскания и резким сбросом скорости движения, по времени действия совпадающим с максимальной величиной угловой скорости рыскания. На попутном и встречном волнении ускорение торможения составляет 74 узл/с<sup>2</sup> и наступает через 1 – 1,5с после возникновения аварии. Чрезвычайно быстрое развитие аварии характерно при движении СВП с КУВ = 90°.

9. Самопроизвольный сброс ВИШ до нуля характеризуется сравнительно медленным ростом угловой скорости рыскания, поэтому движение СВП в режиме автоматической стабилизации курсового или путевого угла исключает развитие аварийной ситуации. При этом наиболее опасно данная аварийная ситуация развивается при движении СВП с КУВ = 180° и 90° из-за возникновения глубокой раскочки корабля по крену и дифференту и низкой эффективности аэроулей.

10. Отказ газотурбинного двигателя одного борта характеризуется наличием постоянной времени, обусловленной инерционными свойствами комплекса: двигатель - нагнетатель - судно, по истечении которого наблюдается резкий рост угловой скорости рыскания, дрейфа, крена и падение скорости хода.

Информация о состоянии газотурбинных двигателей заблаговременно обеспечивает принятие мер по локализации аварийной ситуации. Самое быстрое развитие аварии происходит при движении СВП с КУВ = 90°.

11. Для всех видов аварий технических средств характерно развитие аварийной ситуации по одному или нескольким параметрам:  $\theta$ ,  $\psi$ ,  $\dot{\Phi}$ ,  $\beta$ ,  $dv/dt$  в течение 1 - 10с, что исключает возможность использования предикторного управления движением СВП

#### Литература

1. Короткин И.М. Аварии судов на воздушной подушке. Л.: Судостроение, 1981. 216 с.
2. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Безотказность систем управления движением // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т.1 № 1 (39). С. 185-194.
3. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Анализ и перспективы развития скоростных судов // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т.1 № 3 (41). С. 10-20.
4. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Королёв О.А Информационная система поддержки принятия решения при борьбе за живучесть судна // В сборнике: Технологии построения когнитивных транспортных систем. Материалы всероссийской научно-практической конференции. ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук. 2018. С. 93-99.
5. Колызаев Б.А., Косоруков А.И., Литвиненко В.А. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания. Л.: Судостроение, 1980. 472 с.
6. Система «Модель». Технические условия. Приложение 1 «Математическое описание пространственного движения объекта и работы его механической установки». С71.300.000ТУ. 1979.
7. Отчет по испытаниям моделей силовой установки и турбогенератора для изделия «Тест-КА». ОКБ ИМФ АН УССР. Киев, 1976.
8. Fein J.A., Magnusson A.N. and Moran D.D. Dynamic performance air cushion vehicle in a marine environment. San Diego. California/February 25-27, 1974.
9. Богданов А.Г., Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Синтез оптимальных энергетических характеристик гидроприводов систем управления движением // Морские интеллектуальные технологии. 2017. Т.2 №2 (36). С. 47-54.
10. Богданов А.Г., Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Черненко В.И. Выбор основных энергетических характеристик исполнительного привода аэроуля судна на воздушной подушке // Морские

интеллектуальные технологии. 2017. Т.3 №4 (38). С. 79-83.

11. Скороходов Д.А., Житников В.В. Формирование показателей автоматизации и контроля технических средств. Всесоюзная научно-техническая конференция «Проблемы комплексной автоматизации судовых технических средств». Тезисы докладов НТО им. акад. А.Н.Крылова. Л.: Судостроение, 1982.

#### References

1. Korotkin I.M. Avarii sudov na vozduшной podushke [Crash hovercrafts]. L. Sudostroenie. 1981. 216 p.
2. Kaminsky V.YU., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Bezotkaznost' sistem upravleniya dvizheniem [Reliability of motion control systems] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. T.1 № 1 (39). pp. 185-194.
3. Kaminsky V.YU., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Analiz i perspektivy razvitiya skorostnyh sudov [Analysis and prospects of development of high-speed vessels] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. T.1 № 3 (41). pp. 10-20.
4. Kaminsky V.YU., Skorohodov D.A., Korolyov O.A. Informacionnaya sistema podderzhki prinyatiya resheniya pri bor'be za zhivuchest' sudna [Information system for decision support in the fight for the survivability of the vessel] // V sbornike: Tekhnologii postroeniya kognitivnyh transportnyh sistem. Materialy vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. FGBUN Institut problem transporta im. N.S. Solomenko Rossijskoj akademii nauk. 2018. pp. 93-99.
5. Kolyzaev B.A., Kosorukov A.I., Litvinenko V.A. Spravochnik po proektirovaniyu sudov s dinamičeskimi principami podderzhaniya [Handbook of ship design with dynamic maintenance principles]. L. Sudostroenie. 1980. 472 p.
6. Sistema «Model». Tekhnicheskie usloviya. Prilozhenie 1 «Matematicheskoe opisanie prostranstvennogo dvizheniya ob'ekta i raboty ego mekhanicheskoy ustanovki» [System "Model". Technical conditions. Appendix 1 «Mathematical description of the spatial motion of the object and its mechanical installation»]. S71.300.000TU. 1979.
7. Otchet po ispytaniyam modelej silovoj ustanovki i turbogeneratora dlya izdeliya «Test-KA» [Test report of power plant and turbine generator models for Test-ka product]. OKTB IMF AN USSR. Kiev. 1976.
8. Fein J.A., Magnusson A.N. and Moran D.D. Dynamic performance air cushion vehicle in a marine environment. San Diego. California/February 25-27. 1974.
9. Bogdanov A.G., Kaminsky V.YU., Skorohodov D.A. Sintez optimal'nyh energeticheskikh harakteristik gidroprivodov sistem upravleniya dvizheniem [Synthesis of optimal energy characteristics of hydraulic drives of motion control systems] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2017. T.2 №2 (36). pp. 47-54.
10. Bogdanov A.G., Kaminsky V.YU., Skorohodov D.A., CHernenko V.I. Vybór osnovnyh energeticheskikh harakteristik ispolnitel'nogo privoda aerorulya sudna na vozduшной podushke [The selection of key energy characteristics of the actuator aurora the hovercraft] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2017. T.3 №4 (38). pp. 79-83.
11. Skorohodov D.A., ZHitnikov V.V. Formirovanie pokazatelej avtomatizacii i kontrolya tekhnicheskikh sredstv. Vsesoyuznaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya «Problemy kompleksnoj avtomatizacii sudovyh tekhnicheskikh sredstv» [Formation of indicators of automation and control of technical means. All-Union scientific and technical conference «Problems of complex automation of ship technical means»]. Tezisy dokladov NTO im. akad. A.N.Krylova. L. Sudostroenie. 1982.

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

УДК 514.85 +621.01

### **ГЕОМЕТРИЯ НЕИДЕАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ**

**Владимир Егорович Лелюхин**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры ТПП  
Дальневосточный федеральный университет  
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8  
тел.: 89147235257; e-mail: lelvo@mail.ru

**Ольга Валерьевна Колесникова**

кандидат технических наук, доцент кафедры ТПП  
Дальневосточный федеральный университет  
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8  
тел.: 89146529780; e-mail: miis@mail.ru

**Татьяна Владимировна Антоненкова**

доцент кафедры ТПП  
Дальневосточный федеральный университет  
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8  
тел.: 89147079441; e-mail: antonenkova.tv@dvvu.ru

**Артем Сергеевич Дренин**

аспирант  
Дальневосточный федеральный университет  
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8  
тел.: 89990403818; e-mail: art-drenin@yandex.ru

**Татьяна Андреевна Кузьминова**

аспирант  
Дальневосточный федеральный университет  
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8  
тел.: 89147376513; e-mail: btpdp@mail.ru

#### **Аннотация**

Детали машин и механизмов морской техники имеют различную геометрическую конфигурацию. От этой конфигурации зависит правильность функционирования механизма и эффективность процесса его изготовления. Основой ядер геометрического моделирования современных CAD, CAPP и CAM систем являются положения современной аналитической геометрии. Эта геометрия позволяет строить только идеальные информационные образы геометрических конфигураций. Как показывает практика, расхождения между математической идеализацией геометрических образов и реализованными конструкциями вызваны рядом проблем неразрешимых в рамках существующего параметрического представления средствами аналитической геометрии. Одна проблема заключается в том, что существующие в геометрии инструменты формального описания оперируют с идеальными объектами, не имеющими отклонений. Другая проблема связана с возможностью описания только уже существующих геометрических конфигураций индифферентных к схемам их порождения. В статье рассматриваются обобщенные положения геометрии неидеальных объектов, основанной на структурно параметрическом представлении элементарных поверхностей. Сочетания этих поверхностей, описываемые возможными структурными отношениями в 6-ти мерном пространстве степеней свободы обеспечивают полное многообразие геометрических конфигураций.

**Ключевые слова:** судостроительное производство, геометрия, неидеальные объекты, реальные детали, погрешности размеров, проектирование деталей, CAD системы, CAM системы

### **GEOMETRY OF NONIDEAL OBJECTS IN MARINE ENGINEERING DESIGN AND MANUFACTURING PROCESS**

**Vladimir E. Lelyukhin**

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Product Manufacturing Procedure

Far Eastern Federal University  
690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8.  
tel.: 89147235257, e-mail: lelvo@mail.ru

**Olga V. Kolesnikova**

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Product Manufacturing Procedure

Far Eastern Federal University  
690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8.  
tel.: 89146529780, e-mail: miis@mail.ru

**Tatyana V. Antonenkova**

Associate Professor, the Department of Product Manufacturing Procedure

Far Eastern Federal University  
690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8.  
tel.: 89147079441, e-mail: antonenkova.tv@dvfu.ru

**Artem S. Drenin**

post-graduate student  
Far Eastern Federal University  
690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8.  
tel.: 89990403818, e-mail: art-drenin@yandex.ru

**Tatyana A. Kuzminova**

post-graduate student  
Far Eastern Federal University  
690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8.  
tel.: 89147376513, e-mail: btpdp@mail.ru

**Abstract**

Parts of machines and mechanisms of marine engineering have a different geometric configuration. The correct functioning of the mechanism and the efficiency of its manufacturing process depend on this configuration. The base of geometric modeling cores of modern CAD, CAPP and CAM systems are the provisions of modern analytical geometry. This geometry allows designing only ideal information images of geometric configurations. As practice shows that the discrepancies between the mathematical idealization of geometric images and realized designs are caused by a number of unsolvable problems within the framework of the existing parametric representation by means of analytical geometry. One problem is that the formal description tools in geometry operate with ideal objects that do not have deviations. Another problem is the possibility of describing only already existing geometric configurations that are indifferent to their progression charts. The article discusses general concepts of the geometry of non-ideal objects based on the structurally parametric representation of elementary surfaces. Combinations of these surfaces, described by possible structural relationships in a 6-dimensional space of degrees of freedom, provide a complete variety of geometric configurations.

**Key words:** shipbuilding, geometry, nonideal objects, real parts, dimensional errors, parts design, CAD systems, CAM systems

**Введение**

Применяемые сегодня средства конструирования и технологической подготовки производства в судостроении базируются на CAD, CAPP системах автоматизации конструирования и проектирования технологии [1].

Математическую основу перечисленных систем составляют положения современной аналитической геометрии, включая линейную алгебру, векторную геометрию, проективные пространства и преобразования, инструменты геометрического моделирования, алгебраические и параметрические кривые и поверхности, конструктивная геометрия твердого тела [2].

В последние десятилетия активно развиваются программные продукты с использованием B-сплайнов в NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) и T-сплайнов, обеспечивающие формальное (точное) построение сложных поверхностей в трехмерном пространстве в интерактивном режиме. Это позволяет строить идеальные информационные образы геометрических конфигураций с использованием сложных криволинейных поверхностей [3, 4, 5].

Однако, как показывает практика конструирования и производства изделий судовой техники расхождения между математической идеализацией геометрических образов и реализованными конструкциями деталей вызваны рядом проблем неразрешимых в рамках

существующего параметрического представления средствами аналитической геометрии. Это приводит к некорректным, либо неоднозначным представлением деталей (объектов) на чертежах и 3D моделях, что в конечном итоге сдерживает развитие инструментария цифрового проектирования [6].

**1. Проблемы неоднозначности представления конфигурации деталей**

При проектировании и изготовлении реальных деталей регламентируются пределы допускаемых погрешностей формы и взаимного расположения поверхностей, образующих функционально необходимые геометрические конфигурации [7].

Тем не менее, формальное представление геометрических объектов со времен Пифагора и Евклида благодаря трудам известных ученых Леонардо да Винчи, Рене Декарта, Гаспара Монжа, Н.Ф. Четверухина, А.Д. Посвянского, Поля де Кастельжо, Пьера Безье и др. пережило многочисленные трансформации дойдя до современных теоретических основ, которые обеспечивают представление идеальных конфигураций [3]. Таким образом можно сформулировать две проблемы, неразрешимые в рамках существующих геометрий [8]

Первая проблема заключается в том, что существующие в геометрии инструменты формального описания оперируют с идеальными объектами, элементы которых строго



соответствуют математическим функциям и значениям параметров [8]. При изготовлении машин невозможно обеспечить идеальные размеры и форму поверхностей в процессе изготовления любого материального объекта [7, 8]. Поэтому во всех машиностроительных сферах, включая судостроение и судоремонт используется систематизированный набор регламентов, ограничивающий допускаемые отклонения от идеальных геометрических конфигураций.

На рис.1 показаны примеры определения плоскостей 1, 2 и 3 для идеального и реального образов детали.

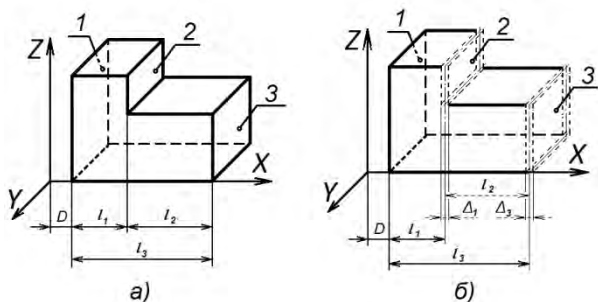


Рис. 1. Взаимное расположение поверхностей: а) идеальное; б) реальное

Для идеальных геометрических конфигураций задание размеров  $l_1$ ,  $l_2$  и  $l_3$  в виде замкнутой размерной цепи не вызывают никаких противоречий (рис. 1а), поскольку справедлива запись  $l_3 = l_1 + l_2$ , а также  $l_2 = l_3 - l_1$  или  $l_1 = l_3 - l_2$ .

В реальной ситуации при обработке указанных трех плоскостей, можно выдержать (настроить) только два размера, например,  $l_1$  и  $l_3$  (рис. 1б), при этом размер  $l_2$  получится «сам по себе» как результат. Характерно, что допустимые погрешности (девиации)  $\Delta_1$  и  $\Delta_3$  для размеров  $l_1$  и  $l_3$  соответственно, приведут к величине погрешности размера  $l_2$  равной сумме  $\Delta_1$  и  $\Delta_3$ . Иными словами, если  $l_2 = l_3 - l_1$ , то  $\Delta_2 = \Delta_1 + \Delta_3$  (рис.1б).

Поэтому ГОСТ 2.307-2011 регламентирует один из размеров замкнутой размерной цепи относить к справочным (в учебной технической литературе эти размеры называются замыкающими) и предельные отклонения таких размеров на чертеже не указываются [9].

**Вторая проблема** связана с возможностью описания только уже существующих геометрических конфигураций индифферентных к схемам их порождения.

В аналитической геометрии плоскость общего положения в трехмерном пространстве описывается следующим образом [10]

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

При описании плоскостей 1, 2 и 3 детали изображенной на рис. 1, уравнение (1) примет вид  $Ax + D = 0$  (2)

Тогда, для определения каждой обозначенной плоскости на рис. 1а, получим соответственно

- 1)  $Ax_1 = D$
- 2)  $Ax_2 = D + l_1$
- 3)  $Ax_3 = D + l_3$

Также непротиворечивой для второй поверхности будет запись

$$Ax_2 = D + l_3 - l_2,$$

а для третьей

$$Ax_3 = D + l_1 + l_2.$$

Приведенный пример демонстрирует тот факт, что при описании геометрической конфигурации реальных объектов теряется очень важная информация о структуре размерных связей, задаваемых конструктором на чертеже, которая как раз и определяет различия в допустимых отклонениях.

На рис. 2 показаны дополнительные варианты определения геометрических конфигураций расстановкой размерных связей между плоскостями 1, 2 и 3 детали, изображенной на рис. 1

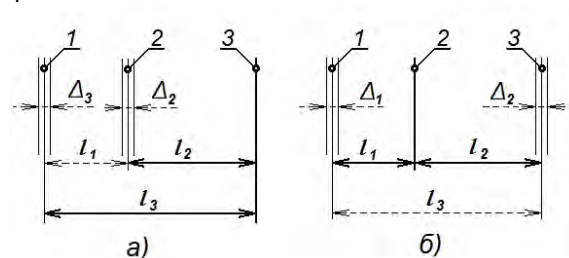


Рис. 2. Порождение различных конфигураций детали расстановкой размерных связей

Как видно на рис. 2а при нормировании величин погрешностей  $\Delta_2$  и  $\Delta_3$  размеров  $l_2$  и  $l_3$  соответственно замыкающим звеном является размер  $l_1$ , погрешность которого равна сумме погрешностей двух других размеров, т.е.  $\Delta_1 = \Delta_2 + \Delta_3$ . Аналогично погрешность замыкающего размера  $l_3$  на рис. 2.б определится как сумма погрешностей размеров  $l_1$  и  $l_2$ , т.е.  $\Delta_3 = \Delta_1 + \Delta_2$ .

Рассмотренные примеры показывают, что для однозначного описания геометрической конфигурации неидеальных (реальных) объектов необходимо дополнить существующий математический инструментарий средствами представления погрешностей формы и расположения поверхностей, а также схемами их порождения. Это обеспечит возможность формирования полных (с точки зрения информационной необходимости и достаточности) геометрических образов различных устройств и механизмов [11].

## 2. Основные положения геометрии неидеальных объектов

Исходным пространством для порождения и существования геометрических объектов является трехмерное евклидово пространство, с шестью степенями свободы [8, 10]. В качестве элементов для формирования трехмерных геометрических конфигураций рассматриваются точки, линии и поверхности.

Точка представляет собой элемент с нулевой размерностью, который является исходным «кирпичиком» для порождения других элементов, из которых формируются геометрические конфигурации.

Линия рассматривается как бесконечное одномерное пространство, представленное неразрывным множеством точек, в окрестности каждой из которых имеются не более двух соседствующих точек, не соприкасающихся друг с

другом. Иными словами, любая линия является непрерывной, гладкой и бесконечной.

В соответствии с двумя видами степеней свободы – перемещение и вращение выделяются две элементарные линии – прямая и окружность.

Прямой называется линия, первые производные во всех её точках совпадают (равны константе). Окружность – линия у которой приращения первых производных между двумя любыми парами равноотстоящих точек равны между собой.

Поверхность есть бесконечное, гладкое двумерное пространство, представленное неразрывным множеством линий, в окрестности каждой из которых имеются не более двух соседствующих линий, не соприкасающихся друг с другом.

Геометрический объект представляет собой замкнутое подпространство, заполненное каким-либо материалом, ограниченное конечной совокупностью  $n$  поверхностей. Заметим, что такая трактовка соответствует понятию детали, изложенному в ГОСТ 2.101-2016 [12].

### 3. Представление геометрической конфигурации реальных деталей

Формирование геометрической конфигурации детали можно представить в виде набора функционально необходимых поверхностей с заданным взаимным их расположением. Это расположение определяется взаимной фиксацией шести степеней свободы, из которых три перемещения вдоль координатных осей  $X_i, Y_i, Z_i$  и три вращения вокруг этих осей  $X_\alpha, Y_\alpha, Z_\alpha$  [8].

Используя сочетания элементарных (прямую и окружность) линий легко формализовать кинематику порождения элементарных поверхностей, к которым относятся плоскость, цилиндр, и сфера (рис. 3).

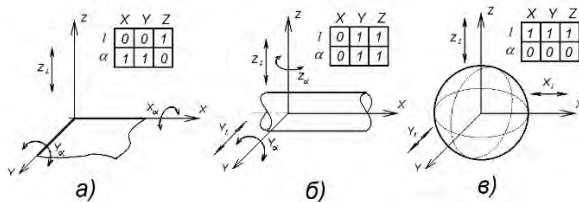


Рис. 3. Порождение элементарных поверхностей сочетанием прямой и окружности

Здесь в шестиклеточных таблицах единицами обозначены фиксируемые степени свободы для ориентации поверхности, а нули характеризуют остаточные степени свободы, которые однозначно определяют комплекс производящих линий для соответствующей поверхности. Например, плоскость (рис. 3а) может порождаться взаимным перемещением трех пар элементарных производящих линий  $(X_i, Y_i)$ ,  $(X_i, Z_\alpha)$  и  $(Y_i, Z_\alpha)$ . Аналогично цилиндрическая поверхность (рис. 3б) может быть получена исключительно перемещением прямой  $(X_i)$  по окружности  $(X_\alpha)$  или наоборот, т.е. только сочетанием  $(X_i, X_\alpha)$ .

На практике подавляющее большинство конструктивных элементов деталей судовых машин ограничивается набором элементарных

поверхностей с заданным относительным расположением.

Формально структура взаимного расположения поверхностей детали отображается шестью графами размерных связей между поверхностями детали, для каждой из 6-ти степеней свободы  $(X_i, Y_i, Z_i, X_\alpha, Y_\alpha, Z_\alpha)$  [7, 8].

Используемый до сих пор в отечественной промышленности инструментарий расчета и анализа размерных цепей [13] существенно ограничивает возможности рассмотрения целостной структуры геометрической конфигурации детали. Поэтому в статье предлагается комплексное рассмотрение размерных связей по каждому из шести направлений в виде графа, отображаемого парой множеств  $(V, E)$ . Здесь множество поверхностей  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  представляется совокупностью вершин графа, а множество  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$  рассматривается как бинарное отношение на  $V$  и отображает пару взаимосвязанных размерных поверхностей [11].

Таким образом любая деталь как геометрический объект должна быть представлена конкретным набором (составом) поверхностей и единственной структурой их взаимоотношений (размерных связей) в шестимерном пространстве степеней свободы, как показано на рис.1 и рис. 2. Только в этом случае можно говорить об однозначной воспроизводимости геометрической конфигурации детали, а, следовательно, и о возможности её корректного изготовления.

Современные формальные способы преобразования поверхностей позволяют выполнять широкий спектр трансформаций элементарных поверхностей для получения сложных гладких поверхностей различного порядка [2, 3, 4].

Если учесть, что поверхность любой сложности можно с достаточной степенью точности аппроксимировать конечным набором элементарных поверхностей с использованием алгоритмов формирования параметрических поверхностей Безье [3, 4], тогда регламентируя степень приближения формы для каждой поверхности можно формализовать представление любой геометрической конфигурации заданному размерных связей, определяющих структуру детали по каждой из шести степеней свободы.

В технике любой механизм представляет собой совокупность конечного числа деталей, сочленённых между собой, так чтобы выполнять действия, которые реализуют заведомо известную функцию. Функциональность (способность устойчивой реализации функции) детали определяется с одной стороны свойствами используемого материала, а с другой её геометрической конфигурацией и точностью воспроизведения.

В статье рассматривается использование геометрии неидеальных объектов для формального проектирования конфигурации детали и технологии её изготовления.

### 4. Конструирование конфигурации деталей

В процессе конструирования элементов деталей, одним из важных факторов является

реализация функций судовой механики, в частности обеспечение подвижности с сопрягаемыми деталями.

Как видно на рис. 3 сопряжения с использованием элементарных поверхностей формально определяют допустимый набор степеней свободы. Например, сопряжение двух плоскостей перпендикулярных оси Z фиксирует перемещение вдоль этой оси ( $Z_i$ ), а также повороты ( $X_\alpha, Y_\alpha$ ) вокруг осей X и Y соответственно (рис. 3а). Сопряжения с цилиндрической поверхностью, расположенной вдоль оси X позволит зафиксировать четыре степени свободы (два перемещения и два поворота) с остаточными возможностями перемещения и поворота относительно оси X (рис. 2б). Как показано на рис. 3в три остаточных степени свободы (повороты вокруг всех трех осей -  $X_\alpha, Y_\alpha, Z_\alpha$ ) позволяют создавать механизмы типа «шаровые пальцы или шаровые опоры».

Такое представление является основой для алгоритмизации не только синтеза структур, но и формирования геометрической конфигурации деталей для многосвязных пространственных механизмов, например, манипуляторов для роботизированных устройств надводной и подводной морской техники.

На рис. 4 в качестве примера показан принцип формирования элементов детали со свободным вращением. Для создания геометрической конфигурации, обеспечивающей одну степень свободы в виде вращения вокруг оси X (рис. 4а) использовано сочетание двух элементарных поверхностей (плоскость перпендикулярная оси X и цилиндр перпендикулярный плоскости ZOY).

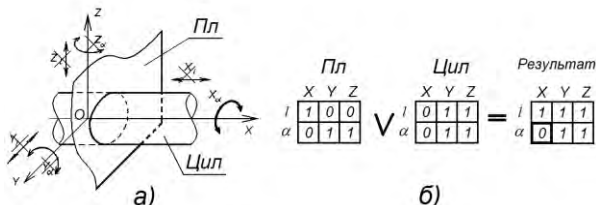


Рис. 4. Схема формирования элементов детали со свободным вращением

Как видно на рис. 4б, поэлементное логическое сложение шестиклеточных таблиц позволяет определить остаточную степень свободы  $X_\alpha$ . Аналогичным образом можно синтезировать любые механизмы с заданными кинематическими функциями.

### 5. Формализация проектирования технологии

Одной из основных задач проектирования технологии изготовления деталей является получение конструктивной конфигурации детали, т.е. формирования процедур обеспечения геометрического облика и его точностных параметров [6, 8].

Установленные авторами связи между конструктивной конфигурацией детали и технологией её изготовления свидетельствуют о возможности формального проектирования процессов получения геометрических параметров деталей [6, 7].

Гипотетически представим, что любую поверхность детали можно обработать за один технологический переход, т.е. множество технологических переходов  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$  соответствует множеству поверхностей детали  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ .

Тогда в технологическом процессе можно выделить две группы независимых процедур. Одна из этих групп непосредственно связана с обработкой поверхностей и включает комплекс технологических переходов, при выполнении которых обеспечивается формообразование поверхностей. Вторая группа и включает в себя процедуры базирования (ориентации) и закрепления (фиксации) заготовки с помощью чего обеспечивается взаимное расположение поверхностей.

Поэтому процесс проектирования технологии разделяется на два независимых этапа.

На первом этапе формируется комплекс технологических переходов для обработки каждой поверхности. В основе проектирования каждого технологического перехода лежит синтез всех возможных методов формообразования рассматриваемой поверхности  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_k\}$ . Под методом формообразования  $f_i$  здесь понимается необходимый набор формообразующих движений режущего инструмента и геометрическая форма его режущей кромки. Процесс синтеза методов обработки заключается в формировании всех возможных пар производящих линий, из которых синтезируется полный набор формообразующих движений и геометрия режущего инструмента на основе классификации изложенной в работах [14, 15].

В качестве примера рассмотрим процесс синтеза методов формообразования цилиндрической поверхности, показанной на рис. 3б. Для этой поверхности остаточными степенями (на рис. 3б в шестиклеточной таблице обозначены нулями) являются перемещение вдоль оси X и поворот вокруг неё. Таким образом, эта поверхность может быть воспроизведена (порождена) перемещением прямой ( $X_i$ ) по окружности ( $X_\alpha$ ), т.е. сочетанием ( $X_i, X_\alpha$ ). Далее, учитывая обратимость поверхности, можно сформировать два варианта порождения поверхности: 1) образующей является перемещение по прямой ( $X_i$ ), а направляющей - по окружности ( $X_\alpha$ ); 2) образующая - перемещение по окружности ( $X_\alpha$ ), направляющая - по прямой ( $X_i$ ). Затем, используя вышеуказанную классификацию методов формообразования [14, 15], для каждого варианта формируются шесть схем формообразования, три из которых реализуют непрерывные методы и три дискретные. Таким образом, множество методов формообразования для данной цилиндрической поверхности содержит двенадцать различных вариантов [16].

На втором этапе проектирования технологии формируются схемы базирования и последовательность смены баз при обработке поверхностей. Алгоритм основан на использовании комплекса размерных связей, который однозначно определяет взаимное расположение поверхностей детали по каждой из 6-ти степеней свободы и тем самым является формальным базисом для

построения процесса синтеза схем базирования в реальных производственных условиях с учетом допустимых колебаний значений размеров [7, 17].

### Заключение

В статье рассмотрены обобщенные положения геометрии неидеальных объектов, основанной на структурно параметрическом представлении элементарных поверхностей, сочетания которых обеспечивает формирование многообразия геометрических конфигураций в соответствии с функциональными требованиями, предъявляемыми к деталям судовых механизмов.

Определение элементарных линий и поверхностей обеспечивает возможность формального представления всех возможных схем

порождения с учетом неидеальных форм и размеров. Детализация размерных взаимосвязей позволяет описывать заданную допустимую девиацию линейных и угловых размеров, определяющих погрешности относительного расположения поверхностей, а также их формы.

Использование геометрии неидеальных объектов при построении ядер CAD, CAM, CAPP систем, позволит не только расширить их функциональные возможности, но и формализовать синтез основных и вспомогательных элементов механизмов, а также создать автоматические системы проектирования технологий обработки деталей на станках.

### Литература

1. Малюх В. Н. Введение в современные САПР: Курс лекций. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 192 с. ISBN 978-5-94074-551-8
2. Goldman R. An Integrated Introduction to Computer Graphics and Geometric Modeling. CRC Press. September 18, 2019. 47p. ISBN 9781138381476
3. David F. R. An Introduction to NURBS with Historical Perspective, Morgan Kaufmann Publishers 2001. – 343 p. ISBN-13:978-1-55860-669-2 ISBN- 10:1-55860-669-6
4. He Y., Wang K., Wang H., Gu X., Qin H. Manifold T-Spline. In: Kim MS., Shimada K. Geometric Modeling and Processing - GMP 2006. Lecture Notes in Computer Science, vol 4077. Springer, Berlin, Heidelberg/ ISBN 978-3-540-36865-6.
5. Бакенов А.С. Т-сплайны: геометрическая гибкость и возможность локального изменения представления поверхности/ Труды 27-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению // Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2017. – сс. 328-331. ISBN 978-5-7944-2963-3
6. Лелюхин В.Е., Игнатъев Ф.Ю., Дренин А.С., Колесникова О.В. Формализация представления геометрической конфигурации деталей машин. // Естественные и технические науки. – 2018. – № 7, с.109-112. ISSN 1684-2626
7. Лелюхин В. Е. Кузьминова Т.А., Колесникова О.В. Влияние геометрической конфигурации детали на технологию её изготовления / Современные научные исследования и инновации. 2015. № 7 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/07/56318> (дата обращения: 05.08.2019). ISSN: 2223-4888
8. Лелюхин В.Е., Игнатъев Ф.Ю., Дренин А.С., Колесникова О.В. Геометрия для описания реальных деталей машин // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 8. – С. 95-99. ISSN 1812-7320; URL: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37126> (дата обращения: 21.04.2019).
9. ГОСТ 2.307-2011. ЕСКД. Нанесение размеров и предельных отклонений. М.: Стандартиформ. 2012. - 31 с.
10. Виноградов И.М. Математическая энциклопедия. Том 1. М.: Наука, 1982. - 1140 с.
11. Лелюхин В. Е., Колесникова О. В., Структурно-параметрическое пространство судовых конструкций и технологий в PLM-системах. /Вестник инженерной школы ДВФУ. 2019. № 1(38) с.99-107. ISSN 2227-6858. DOI.org/10.5281/zenodo.2578700. URL: <https://e.mail.ru/attachment/1551738399000000199/0:1> (дата обращения: 05.08.2019).
12. ГОСТ 2.101-2016. ЕСКД. Виды изделий. М.: Стандартиформ, 2019. - 9 с.
13. РД 50-635-87. Методические указания. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета линейных и угловых цепей. М.: Издательство стандартов. 1987 г. – 45 с.
14. Лелюхин В.Е. Классификация методов формообразования поверхностей при изготовлении детали. Научный журнал. ЭПИ. Вестник инженерной школы ДВФУ. 2012. № 1 (10). с. 14-17. ISSN 2227-6858. <https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/184/2012-1-3.pdf>
15. Lelyukhin V. E., Kolesnikova O. V., Kuzminova T. A., "Classification of Methods for Forming Surfaces When Machining Parts on Machine Tools," 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-5. doi: 10.1109/EastConf.2019.8725366
16. Лелюхин В. Теория синтеза методов формообразования поверхностей детали. Издательский Дом: LAP LAMBERT Academic Publishing /Германия - 2015. 80 с. ISBN 978-3-659-36056-5
17. Gurami Sh. Tsitsiashvili, Vladimir E. Lelyukhin, Olga V. Kolesnikova, Marina A. Osipova. Formal design of structure process in machining parts. // Modeling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems / Proceedings of the Thirteenth International Scientific School MA SR - 2016 / SUAI, SPb., 2016, p. 76-79. ISBN 978-5-8088-1128-7

### References

1. Malyuh V. N. (2010). Vvedenie v sovremennye SAPR: Kurs lektsiy. – М.: ДМК Press,. 192 p. ISBN 978-5-94074-551-8
2. Goldman R. (2019). An Integrated Introduction to Computer Graphics and Geometric Modeling. CRC Press. September 18, 47p. ISBN 9781138381476
3. David F. R. (2001). An Introduction to NURBS with Historical Perspective, Morgan Kaufmann Publishers 343 p. ISBN-13:978-1-55860-669-2 ISBN- 10:1-55860-669-6

4. He Y., Wang K., Wang H., Gu X., Qin H. (2006). Manifold T-Spline. In: Kim MS., Shimada K. Geometric Modeling and Processing – GMP. Lecture Notes in Computer Science, vol 4077. Springer, Berlin, Heidelberg/ ISBN 978-3-540-36865-6.
5. Bakenov A.S. (2017). T-splayny: geometricheskaya gibkocyt i vozmozhnost lokalynogo izmeneniya predstavleniya poverhnosti/ Trudy 27 Mezhdunar. konf. po kompyuternoy grafike i mashinnomu zreniyu - Perm. gos. nats. issled. un-t. Perm., pp. 328-331. ISBN 978-5-7944-2963-3
6. Lelyukhin V. E., Ignatev F. Yu., Drenin A. S., Kolesnikova O. V. (2018). Formalizatsiya predstavleniya geometricheskoy konfiguratsii detaley mashin. – Estestvennye I tehnicheckie nauki. № 7, pp.109-112. ISSN 1684-2626
7. 2 Lelyukhin V. E., Kuzminova T.A., Kolesnikova O. V. (2015). Vliyanie geometricheskoy konfiguratsii detail na tehnologiyu eyo izgotovleniya. – Sovremennye nauchnye issledovaniya I innovatsii. № 7 URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/07/56318> (data obrascheniya: 05.08.2019). ISSN: 2223-4888
8. Lelyukhin V. E., Ignatev F. Yu., Drenin A. S., Kolesnikova O. V. (2018). Geometriya dlya opisaniya realnyh detaley mashin. – Sovremennye naukoemkie tehnologii. № 8. 95-99. ISSN 1812-7320; URL: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37126> (data obrascheniya: 21.04.2019).
9. GOST 2.307-2011. ESKD. Nanesenie razmerov I predelnyh odkloneniy. M.: Standartinform. 31 p.
10. Vinogradov I.M. (1982). Matematicheskaya entsiklopediya. Tom 1. M.: Nauka. 1140 p.
11. Lelyukhin V. E., Kolesnikova O. V. (2019). Strukturno-parametricheskoe prostranstvo sudovyh konstruksiy I tehnologiy v PLM-sistemah. – Vestnik inzhenernoy shkoly DVFU. № 1(38) 99-107. ISSN 2227-6858. DOI.org/10.5281/zenodo.2578700. URL: <https://e.mail.ru/attachment/15517383990000000199/0:1> (data obrascheniya: 05.08.2019).
12. GOST 2.101-2016. ESKD. Vidy izdeliy. M.: Standartinform, 2019. - 9 c.
13. RD 50-635-87. (1987). Metodicheskie ukazaniya. Tsepi razmernye. Osnovnye ponyatiya. Metody rascheta lineynyh I uglovyh tsepey. M.: Izdatelstvo standartov. – 45 p.
14. Lelyukhin V. E. Klassifikatsiya metodov formoobrazovaniya poverhnostey pri izgotovlenii detaili. Nauchny zhurnal. EPI. Vestnik inzhenernoi shkoly DVFU. 2012. №1 (10). c. 14-17. ISSN 2227-6858. <https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/184/2012-1-3.pdf>
15. Lelyukhin V. E., Kolesnikova O. V., Kuzminova T. A. (2019). Classification of Methods for Forming Surfaces When Machining Parts on Machine Tools. International Science and Technology Conference "EastConf", Vladivostok, Russia, pp. 1-5. doi: 10.1109/EastConf.2019.8725366
16. Lelyukhin V. E. Teoriya sinteza metodov formoobrazovaniya poverhnostey detail. Izdatel'skiy Dom LAP LAMBERT Academic Publishing /Германия - 2015. 80 с. ISBN 978-3-659-36056-5
17. Gurami Sh. Tsitsiashvili, Vladimir E. Lelyukhin, Olga V. Kolesnikova, Marina A. Osipova. (2016). Formal design of structure process in machining parts. // Modeling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems / Proceedings of the Thirteenth International Scientific School MA SR - 2016 (Saint-Petersburg, Russia, June, October 25-28, 2016) / SUAI, SPb., p. 76-79. ISBN 978-5-8088-1128-7

УДК 621.642.3

## ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ МИГРАЦИИ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В МОРСКИЕ АКВАТОРИИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОРТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

**Алия Рафаэлевна Хуснуллина**

аспирант кафедры экологии промышленных зон и акваторий  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
Российская Федерация, 190121, Санкт Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: aliya.r@inbox.ru

**Юрий Аркадьевич Нифонтов**

горный инженер, доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой «Экология промышленных зон и акваторий»  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
Российская Федерация, 190121, Санкт Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: nifontov@yandex.ru

### Аннотация

В статье проведен обзор основных проблем, связанных с возможным загрязнением морских акваторий и прибрежных зон нефтепродуктами, рассмотрены варианты попадания нефтепродуктов окружающую среду, способы, используемые предприятиями для предупреждения, ликвидации и минимизации последствий аварийных выбросов нефтепродуктов в морские акватории.

В статье проведен обзор основных проблем, связанных с возможным загрязнением морских акваторий и прибрежных зон нефтепродуктами, описаны варианты попадания нефтепродуктов окружающую среду, способы, используемые предприятиями для предупреждения, ликвидации и минимизации последствий аварийных выбросов нефтепродуктов в морские акватории. Рассмотрены основные различия между аварийными выбросами и постоянным загрязнением морских акваторий нефтепродуктами, приведены данные об опасности таких загрязнений.

С целью предупреждения возможных последствий эксплуатации резервуаров рассмотрены существующие методы гидроизоляции поверхностей резервуаров, приведены основные плюсы и минусы применяемых технологий. Предложен вариант использования технологии, применяемой в практике ведения горных работ, позволяющей повысить устойчивость и осушить обводненный участок путем строительства противодиффузионных экранов. Приведен обзор проведенных исследований свойств вязкоупругих составов, рассмотрена возможность их использования для создания защиты резервуарных парков на территории нефтеналивных терминалов.

**Ключевые слова:** морские акватории, нефтепродукты, резервуары, нефтеналивные терминалы, противодиффузионные экраны, прибрежные зоны.

## POSSIBLE WAYS TO PREVENT OIL POLLUTION MIGRATION TO SEA WATER AREA DURING PORT FACILITIES OPERATION

**Aliya R. Khusnullina**

post graduate student of department "Ecology of industrial zones and water areas"  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: h.aliya@list.ru

**Yuri A. Nifontov**

Mining Engineer, Dr.Sci.Tech, Professor  
Head of the department "Ecology of industrial zones and water areas"  
St. Petersburg State Marine Technical University  
Russian Federation, 190121, St. Petersburg, st. Lotsmanskaya, 3  
e-mail: nifontov@yandex.ru

### Abstract

The article reviewed the main problems related to the possible pollution of marine areas and coastal zones with petroleum products, considered the options of oil products release to the environment, methods used by enterprises to prevent, eliminate and minimize the consequences of emergency emissions of petroleum products into marine areas.

Existing methods are considered

The article provides an overview of the main problems related to possible pollution of marine areas and coastal zones with petroleum products, describes the options of oil products release to the environment, methods used by enterprises to prevent, eliminate and minimize the consequences of emergency emissions of petroleum products into marine areas. The main differences between emergency emissions and permanent pollution of marine areas with oil products are considered, data on the danger of such contamination are given.

In order to prevent possible consequences of tanks operation, the existing methods of waterproofing of tank surfaces are considered, the main advantages and disadvantages of the applied technologies are given. Disclosed is a version of using the technology used in mining practice, which enables to increase stability and drain the watered area by construction of anti-filtration screens. An overview of carried out studies of properties of viscoelastic compositions is given, the possibility of their use for creation of protection of tank parks on the territory of oil terminals is considered.

**Keywords:** sea water areas, oil products, reservoirs, oil terminals, anti-filtration screens, coastal zones.

### Введение

Одним из самых опасных, по степени воздействия на окружающую среду, веществ является нефть и ее производные. Существует несколько путей попадания нефтепродуктов в морскую акваторию:

- проливы нефтепродуктов при бункеровке судов и перекачке нефтепродуктов судно-суша и наоборот;

- утечки нефтепродуктов вследствие аварий на береговых сооружениях и судах;

- утечки с береговых баз хранения нефтепродуктов;

- сброс с судов льяльных вод, содержащих примеси нефтепродуктов;

- попадание загрязненных нефтепродуктами сточных вод через систему канализации и другие инженерные коммуникации.

По объему загрязняющих веществ, попадающих в окружающую среду загрязнения можно условно разделить на группы:

- залповые разливы нефтепродуктов, являющиеся результатом нештатных ситуаций: аварий, аварийных выбросов и утечек;

- постоянные (периодические) загрязнения, образуются вследствие разгерметизации портовых нефтеналивных терминалов, нефтепроводов, других сооружений и систематических утечках нефтепродуктов в малых количествах, которые сложно обнаружить.

Залповые разливы представляют серьезную угрозу для окружающей среды, основная опасность состоит в объеме загрязняющего вещества, попадающего в окружающую среду. Также, велик риск миграции загрязнений на значительные расстояния за счет внешних условий, при этом происходит загрязнение прибрежных зон и акваторий. Частота происшествий, в результате которых происходят залповые разливы (выбросы) загрязняющих веществ не так велика. Кроме того предприятия, эксплуатирующие опасные производственные объекты, а также перевозящие опасные грузы обязаны иметь план аварийной ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов (ПЛАРН), без которого невозможно получение лицензии на эксплуатацию данных объектов [1].

ПЛАРН разрабатывается на основе прогнозирования сценариев возникновения и развития аварий, возможного развития аварий, анализа достаточности имеющихся или планируемых мероприятий, препятствующих возникновению и развитию аварий, а также возможных действий персонала, эксплуатирующих производственные объекты и аварийных служб, привлекаемых для локализации и ликвидации аварий на соответствующих стадиях их развития.

В самом Плана рассматриваются возможные аварийные ситуации, порядок действий персонала и аварийно-спасательных формирований, порядок оповещения аварийных служб, персонала и способы локализации арий.

Помимо самого плана Компании обязуются резервировать финансовые средства на случай необходимости ликвидации аварий, заключают договоры с аварийно-спасательными формированиями, которые будут ликвидировать аварии, проводят тренировки.

Отличием постоянных загрязнений является их условная «невидимость». При разгерметизации емкостей, предназначенных для хранения нефтепродуктов на территории нефтебаз, нефтеналивных терминалов, не происходит единовременного масштабного пролива нефтепродуктов, которые можно увидеть, миграция загрязнений происходит в небольших объемах на постоянной основе. Жидкие фракции разносятся на большие расстояния, за счет грунтовых вод, а также попадают в прибрежную зону.

Таким образом, с точки зрения воздействия на окружающую среду, постоянные загрязнения представляют большую угрозу для окружающей среды.

### Существующие способы защиты прибрежных зон

С целью предупреждения миграции нефти и ее производных производятся работы по гидроизоляции емкостей, предназначенных для их хранения.

Выбор способа гидроизоляции зависит от материала, из которого выполнен резервуар, а также веществ, которые в нем хранятся.

На сегодняшний день, большинство, имеющиеся способов гидроизоляции применяются на поверхности резервуаров, самыми распространенными являются:

- **использование мембран** для гидроизоляции: вследствие того, что большинство резервуаров выполняется в заглубленном или подземном варианте, несмотря на антикоррозийную обработку, происходит окисление и коррозия металла. Мембрана укладывается на стенки и дно резервуара, сваривается специальным оборудованием. Защитный эффект достигается путем прекращения контакта с жидкостью.

- **использование битумной мастики:** разделяется по способу нанесения на поверхность, может быть горячего и холодного нанесения. Чаще всего битумная мастика горячего нанесения используется на крупных объектах, поскольку является более экономичной по сравнению со вторым вариантом. К основным преимуществам

можно отнести: надежную защиту от влаги, соответственно от плесени и грибка, практически полная непроницаемость, высокая прочность, устойчивость к перепадам температур и влажности.

- **проникающая гидроизоляция (используется для железобетонных резервуаров).** Обработка таких конструкций производится специальными составами, действие которых сводится к проникновению в структуру поверхности изолируемого материала и его приповерхностную зону и там фиксируются как нерастворимые химические соединения. Одним из преимуществ данного способа является то, что материал замещает в порах воду. Кроме того, происходит заполнение полостей и трещин, за счет чего увеличивается прочность материала.

- **жидкая резина (разновидность проникающей гидроизоляции):** представляет собой резиновую мембранную пропитку, обладающую проникающим свойствами. Отличием от проникающей гидроизоляции является не только проникновение в поровое пространство, а то, что данный материал образует на поверхности непроницаемую пленку. Данный способ сложнее для выполнения в техническом плане, поскольку требуется проведение дополнительных процедур по обработке поверхностей резервуаров.

- **полимерцементная изоляция:** в отличие от гидроизоляции отличается невысокой стоимостью. Способ нанесения – ручной. Отличается длительным сроком службы.

Наиболее распространенными являются методы восстановления герметичности резервуаров, сосредоточены на проведении работ на локальных сооружениях, но не гарантирует герметизацию всего резервуарного парка.

Возможным решением проблемы предупреждения постоянного загрязнения морских акваторий и прибрежных зон может стать технология строительства гидроизоляционных экранов по всему периметру зоны хранения нефтепродуктов.

Так, в практике проведения горных работ широкое распространение получили способы повышения устойчивости и осушения обводненных участков в горных выработках путем строительства противофильтрационных экранов с использованием вяжущих минеральных материалов [3]

Технология ведения работ заключается в создании преграды на пути миграции загрязнения путем заполнения порового пространства горных пород, трещин и пустот специальными составами, которые могут быть как на основе минеральных вяжущих (например, портландцемент), так и используются более современные материалы, относящиеся к категории вязкоупругих составов.



Рис. 1. Частица вязкоупругого состава до контакта с водой

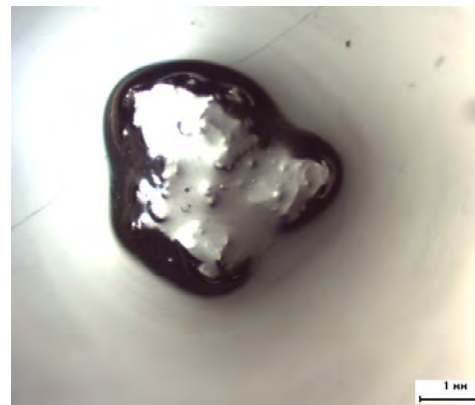


Рис. 2. Частица вязкоупругого состава после контакта с водой

#### По способу исполнения противофильтрационные экраны различают:

- **инъекционного типа:** представляют собой сеть скважин, через которые в горную породу нагнетаются составы под давлением. К минусам можно отнести сложность исполнения, поскольку необходимо четко определять интервал нагнетания, при неверных расчетах и ошибках в технологии выполнения работ, резко увеличивается расход материала и соответственно стоимость работ. Преимущества данного метода, при правильном выполнении, подобная завеса является постоянной защитой.

- **мерзлотные завесы** – являются временными сооружениями, представляют собой стену из льда в горной породе. Плюсы – подходит для всех типов пород, минусы – ограничение по времени, достаточно высокая стоимость;

- **«стена в грунте»** - искусственные траншеи заполняются бетоном, либо создается стена из свай. Плюсы – простота выполнения, минусы – невозможно добиться 100 % герметичности.

#### Комплекс исследований

С целью определения возможности использования вязкоупругих составов для предупреждения миграции загрязнений за пределы резервуарных парков был проведен комплекс исследований, в ходе которого определялись следующие свойства полученных составов [2]:



1. набухающая способность;
2. взаимодействие с дисперсионными средами различной минерализации;
3. динамическое напряжение сдвига и пластическая вязкость;
4. оценка воздействия низких температур.

Для оценки набухающей способности расчетное количество полимер-минеральной смеси затворялось водой и технологическими жидкостями с различными показателями pH. Оценка увеличения объема проводилась каждые 1-2 минуты. Увеличение объема определялось в процентах от первоначального объема смеси.

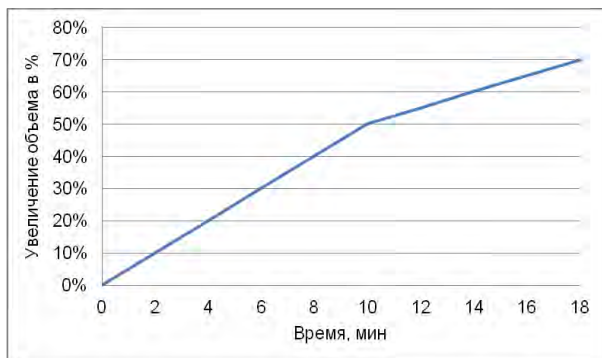


Рис.3. Динамика увеличения объема вязкоупругой полимер-минеральной смеси в нейтральной среде (pH=8)

Эксперимент проводился с оценкой влияния минерализации дисперсионной среды на набухающую способность вязкоупругой смеси.

По результатам исследований зафиксировано, наиболее активная фаза роста объема наблюдается в первые 5-7 минут взаимодействия вязкоупругой смеси с дисперсионной средой, до 40 % от первоначального объема. Через 10-15 минут раствор приобретает гелеобразную структуру. Как можно увидеть из представленной диаграммы (Рисунок 3) процесс, с течением времени замедляется.

На рисунке 4 представлена зависимость увеличения объема полимер-минеральной вязкоупругой смеси в зависимости от минерализации жидкости, используемой для затворения в средах с различной минерализацией, нейтральная, щелочная, кислая.

В соответствии с представленными диаграммами, при значении pH=4, объем получаемого раствора на 50 % меньше, чем за тот же промежуток времени, при затворении того же объема смеси технической жидкостью pH=6,8 (нейтральная среда). При использовании жидкости затворения pH=9,5 (щелочная среда), наблюдается уменьшения объема – 20 %, активной фазы роста объема не наблюдается.

Экспериментально установлено, что минерализация дисперсионной среды негативно сказывается на увеличении объема смеси в процессе коагуляции порового и/или трещинного пространства.

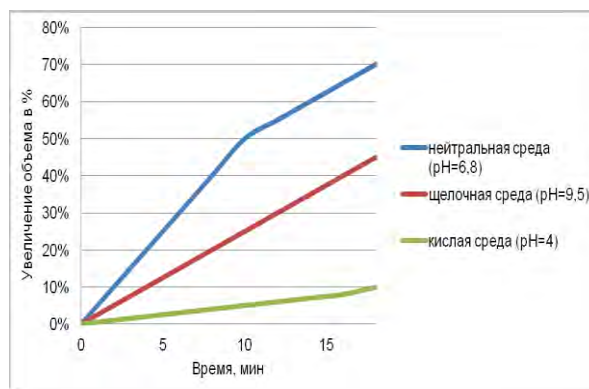


Рис.4. График изменения увеличения объема вязкоупругой полимер-минеральной смеси в зависимости от минерализации жидкости затворения, с течением времени

Данный процесс можно объяснить деструкцией активной части полимерного наполнителя рабочей композиции.

Для исследования показателей статического напряжения сдвига использовался прибор СНС-2, на Рисунке 5 представлены данные об изменениях показателей напряжения сдвига и пластической вязкости для растворов, полученных на основе полимер-минеральной вязкоупругой смеси с различным процентным содержанием по массе.

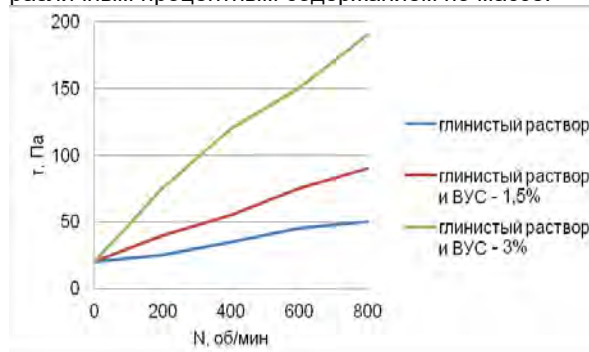


Рис.5. Влияние частоты вращения ротора вискозиметра на значение показателя статического напряжения сдвига)

По результатам данных, приведенных на рисунке 6 - видно, что рост указанных параметров зависит от процентного содержания смеси в исходном растворе, данные первоначальных параметров и полученных различаются в 1,5-2,5 раза.

**Исследование воздействия низких температур** проводилась по ГОСТ 10060-2012.

Методика проведения испытаний заключалась в следующем:

1. полученные растворы разливались по формам и охлаждались до температур: -10, -30, -60 °С с использованием низкотемпературных морозильных камер;
2. после оттаивания образцов проводился полный комплекс исследований структурно-реологических свойств растворов;
3. исследования проводились в течение 7 циклов замораживание – оттаивание;

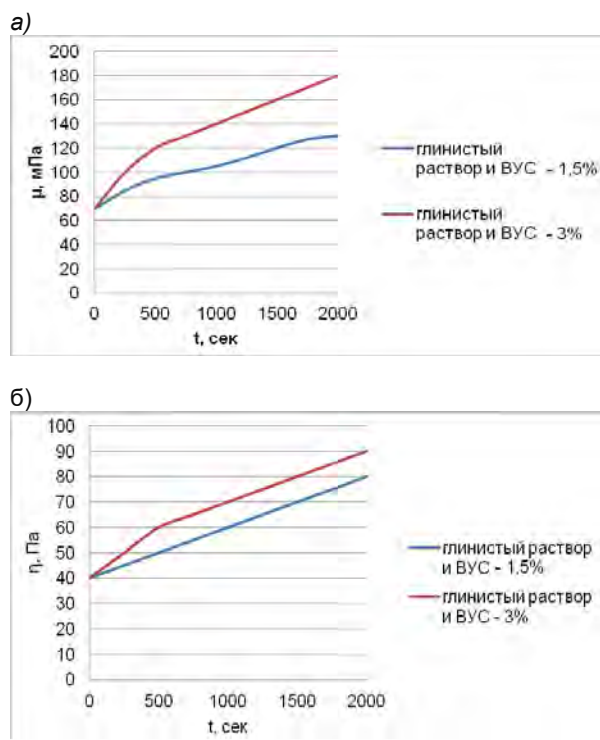


Рис. 6. Изменение с течением времени

а) показателя вязкости полученного раствора плотностью  $1110 \text{ кг/м}^3$  с различным процентным содержанием полимер-минеральной вязкоупругой смеси; б) показателя динамического напряжения сдвига раствора плотностью  $1110 \text{ кг/м}^3$  с различным процентным содержанием полимер-минеральной вязкоупругой смеси

4. перед проведением испытаний проводился визуальный контроль испытуемых образцов.

5. наблюдения за состоянием образцов, и их испытания выполнялись через 3; 7; 28; 90 суток хранения.

После проведения циклических замораживаний-оттаиваний и исследований полученных образцов получены следующие результаты:

1. Количество циклов не оказывает влияние на структурно-реологические параметры исследуемых образцов;
2. При размораживании разрушение структуры не происходит;
3. При поступлении технологической жидкости наблюдается активная фаза роста объема исследуемых образцов.

На основе полученных данных можно сделать вывод о том, что низкие температуры, до  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ , не оказывают негативного влияния на свойства составов, после размораживания наблюдается полное восстановление свойств.

Проведенный комплекс исследований, позволяет сделать выводы о том, что вязкоупругие составы, обладают рядом качеств, благодаря которым, являются наиболее приемлемым материалом для проведения инъекционных работ, в частности:

1. конечный продукт увеличивается в объеме, в зависимости от минерализации среды;
2. конечный продукт не твердеет, представляет собой резиноподобную структуру;
3. составы стабильны, не требуется дополнительная обработка полимерами и другими наполнителями;
4. полностью сохраняются свойства после циклического замораживания-оттаивания;
5. составы обладают высокой проникающей способностью и хорошей адгезией.

#### Апробация результатов лабораторных исследований

Результаты выполненных лабораторных исследований получили подтверждение при моделировании процесса создания изоляционной завесы путем прокачки изолирующей полимерной композиции в проницаемую зону горных пород (Нифонтов Ю.А., Никулин А.А., Головкин В.Г., 2019 г.). При этом установлено, что перекрытие фильтрационного сечения модели формируемой завесой (созданным полимер-минеральным телом) в критическом интервале горных пород (полмиктовые пески) до  $85\div 90\%$  позволяет снизить их фильтрационную способность (коэффициент фильтрации) в десятки раз — с  $8\div 8,5 \text{ м/сут}$  до  $0,25\div 0,35 \text{ м/сут}$  (Рис. 7).

Обустройство завес в природных условиях полностью подтверждает полученные данные.



Рис. 7 Моделирование создания изоляционно-фильтрационной завесы в лаборатории (Нифонтов Ю.А. НИЛ "Геолого-геофизические технологии промышленного освоения арктических территорий и акваторий северных морей" СПбГМТУ, Никулин А.А.

ООО "Центр геотехнических решений", 2019 г.)

#### Заключение

Так, использование технологий инъекционного типа вязкоупругими составами с целью предупреждения миграции загрязнений за территорию резервуарных парков позволит:

1. создавать двусторонние экраны не пропускающие загрязнения в окружающую среду при разгерметизации емкости, и препятствующие поступлению жидкости внутрь емкости;

2. использовать данную технологию в сейсмически-опасных зонах, за счет того, что используемый материал не твердеет;

3. использовать технологию в зонах, сложенных многолетнемерзлыми породами, за счет невосприимчивости материалов к перепадам температур;

4. создавать долговременную защиту за счет того, что материал доставляется в массив под давлением, заполняет поровое пространство и пустоты, соответственно не вымывается в течение длительного времени;

5. использовать дополнительные способы защиты инженерной защиты.

#### Литература

1. Карпунина В.П. и др. Определение необходимого уровня надежности систем подводной добычи для обеспечения экологической и промышленной безопасности в Арктическом нефтегазовом регионе / В.П. Карпунина, Ю.А. Нифонтов, С.Г. Чулкин, К.С. Надиров, Б.Т. Ратов // Морские интеллектуальные технологии, № 2 (44) Т.1 2019, Санкт-Петербург, 2019, - С. 86-93.
2. Нифонтов, Ю.А. и др. Многофункциональные полимер-углеродные композиции для модификации тампонажных цементных смесей / Ю.А. Нифонтов, З.З. Шарафутдинов, Г.В. Черкаев, Б.Т. Ратов // Труды Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития геологического кластера: образование – наука – производство», КазНТУ, Алматы. 2014 — С. 431-434
3. Dvoynikov M.V., Blinov P.A., Rheological and Filtration Parameters of the Polymer Salt Drilling Fluids Based on Xanthan Gum / Journal of Engineering and Applied Sciences, № 13, Т 14, 2018. pp. 5661 - 5664.

#### References

1. Karpunina V.P. et al. Determination of the required level of reliability of underwater production systems to ensure environmental and industrial safety in the Arctic oil and gas region/V.P. Carpunina, Y.A. Nifontov, S.G. Chulkin, K.S. Nadirov, B.T. Ratov//Marine intellectual technologies, № 2 (44), 2019, St. Petersburg, 2019, - p. 86-93.
2. Nifontov, Yu.A. et al. Multifunctional polymer-carbon compositions for modification of plugging cement mixtures/Yu.A. Nifontov, Z.Z. Sharafutdinov, G.V. Chernayev, B.T. Ratov//Works of the International Scientific and Practical Conference "Problems and Prospects of Development of Geological Cluster: Education - Science - Production," KazNTU, ALMATY. 2014 there is Page 431-434
3. Dvoynikov M.V., Blinov P.A., Rheological and Filtration Parameters of the Polymer Salt Drilling Fluids Based on Xanthan Gum / Journal of Engineering and Applied Sciences, № 13, Т 14, 2018. pp. 5661 - 5664.

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

УДК 621.891

### **ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ ДВС ПУТЕМ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПРИМЕНЯЕМЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Иван Николаевич Гужвенко**

ассистент кафедры «Техника и технологии наземного транспорта»  
Астраханский государственный технический университет  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16  
e-mail: ivan.3124@yandex.ru

**Аршавир Петрович Перекрестов**

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Механика и инженерная графика»  
Астраханский государственный технический университет  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16  
e-mail: pap1943@rambler.ru

**Василий Александрович Чанчиков**

кандидат технических наук, заместитель руководителя Инженерного проектного офиса  
Астраханский государственный университет  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а  
e-mail: bazelius87@mail.ru

**Нина Владимировна Прямухина**

кандидат биологических наук, специалист Инженерного проектного офиса  
Астраханский государственный университет  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а  
e-mail: ninafishwom@mail.ru

**Аким Владимирович Павлов**

директор Инжинирингового центра  
Астраханский государственный университет  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а  
e-mail: pavlov.akim@gmail.com

#### **Аннотация**

В работе приводятся результаты исследований влияния переменных характеристик смазочных масел судового назначения (концентрация слоистого модификатора трения в смазочном масле, вязкость смазочного масла, контактное давление в зоне трения) на трибологические параметры деталей цилиндропоршневой группы судовых дизельных двигателей внутреннего сгорания. Рассматриваются вопросы повышения надежности и износостойкости цилиндропоршневой группы судовых дизельных двигателей при введении в состав базового смазочного масла слоистого модификатора трения в концентрации в пределах 1,0 об.%. Проведены сравнительные трибологические исследования смазочных масел М-16Г2ЦС и М-14В2, в том числе, с содержанием присадки на основе диселенида молибдена. Показаны зависимости изнашивания деталей цилиндропоршневой группы судового двигателя от вязкостных параметров изучаемых смазочных материалов. Проведены расчеты силы трения и коэффициента трения в условиях переменных характеристик смазочных материалов.

**Ключевые слова:** смазочное масло, диселенид молибдена, цилиндропоршневая группа, судовой дизельный двигатель, противоизносная присадка, коэффициент трения.

### **AN INCREASING OF THE WEAR RESISTANCE OF SOME PARTS OF SHIPBOARD INTERNAL COMBUSTION ENGINES BY MODIFICATION OF APPLIED LUBRICANTS**

**Ivan N. Guzhvenko**

the assistant of department «Engineering and Technology of Land Transport»  
Astrakhan state technical university  
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation  
e-mail: ivan.3124@yandex.ru

**Arshavir P. Perekrstov**

Cand. Sci. Tech., the associate professor, the professor of department «Mechanics and engineering graphics»  
Astrakhan state technical university  
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation  
e-mail: pap1943@rambler.ru

**Vasily A. Chanchikov**

Cand. Sci. Tech., the deputy head of Engineering Project Office  
Astrakhan State University  
Tatishcheva, 20a, Astrakhan, 414056, Russian Federation  
e-mail: bazelius87@mail.ru

**Nina V. Pryamukhina**

Cand. Sci. Biol., the specialist of Engineering Project Office  
Astrakhan State University  
Tatishcheva, 20a, Astrakhan, 414056, Russian Federation  
e-mail: ninafishwom@mail.ru

**Akim V. Pavlov**

the head of Engineering Center  
Astrakhan State University  
Tatishcheva, 20a, Astrakhan, 414056, Russian Federation  
e-mail: pavlov.akim@gmail.com

**Abstract**

The paper presents the results of studies of the influence of variable characteristics of marine lubricants for use (concentration of a layered friction modifier in lubricating oil, viscosity of lubricating oil, contact pressure in the friction zone) on the tribological parameters of cylinder piston parts of marine diesel engines. The problems of increasing the reliability and wear resistance of a cylinder-piston group of marine diesel engines with the introduction of a layered friction modifier in the base lubricating oil in a concentration within 1.0 vol.% Are considered. Comparative tribological studies of lubricating oils M-16G2TsC and M-14B2, including those containing additives based on molybdenum diselenide, were carried out. Dependences of wear of parts of the cylinder-piston group of a marine engine on the viscosity parameters of the studied lubricants are shown. The friction force and friction coefficient are calculated under the conditions of variable characteristics of lubricants.

**Key words:** lubricating oil, molybdenum diselenide, cylinder-piston group, marine diesel engine, antiwear additive, coefficient of friction.

**Введение**

Трение и изнашивание в цилиндропоршневой группе (ЦПГ) дизельного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) судового назначения является сложным процессом со следующими характерными особенностями:

- возвратно-поступательное движение с меняющейся от наибольшей к наименьшей (нулевой) скорости хода поршня и поршневых колец по цилиндрической гильзе вблизи мертвых точек хода;

- большая контактная температура поверхностей трения и соответственно большая теплоотдача от цилиндрической гильзы в среду охлаждения двигателя;

- непостоянная по величине и уменьшающаяся до критических значений вблизи мертвых точек хода толщина смазочной пленки;

- большие контактные нагрузки (особенно при перекладке поршня и компрессионных колец от стенки к стенке гильзы) юбки поршня, рабочей кромки поршневого кольца и зеркала гильзы под действием большого внутрицилиндрового рабочего давления двигателя.

Общая совокупность указанных выше факторов, сопровождающих процесс трения подвижных (кольца и поршень) о неподвижные (гильза) деталей ЦПГ дополняется, кроме того, большой вероятностью попадания во внутрицилиндровое пространство охлаждающей воды или запыленного воздуха. Эти дополнительные факторы создают предпосылки для перехода деталей ЦПГ от нормальной скорости изнашивания к ускоренной ввиду дополнительных коррозионных и абразивных составляющих процесса трения.

Совершенно очевидным в связи с этим для уменьшения изнашивания ЦПГ представляется необходимость к переходу от граничного механизма трения к полужидкостному в трибологической паре «компрессионное кольцо-рабочий цилиндр». Перспективным в техническом плане шагом к переходу от трения при контакте микронеровностей поверхностей деталей ЦПГ к полужидкостному и гидродинамическому механизму их истирания является создание защитного слоя на этих поверхностях. Технически такой слой, толщина которого достигает 0,1-0,22 мкм, может быть создан введением в состав базового смазочного масла специальных твердосмазочных порошков типа сульфидов, селенидов или силицидов. Все они являются дихалькогенидами тугоплавких материалов типа серы, молибдена, кремния, а также других более редких металлов. Сернистые соединения типа MoS<sub>2</sub> давно и успешно используются в машиностроительной промышленности и создании смазочных материалов для тяжело нагруженных узлов трения [1]. Силициды типа SiS<sub>n</sub> давно охарактеризованы в отдельных литературных источниках, как достаточно эффективные в условиях высоких температур (200-600°C), но обладающие достаточно высокими энергетическими затратами на трение поверхностей [2]. Диселенид MoSe<sub>2</sub> также охарактеризован в ряде периодических литературных источников [3-5] как перспективный материал для создания трибологических спеченных поверхностей, сформированных на поверхности традиционных истирающихся металлов (сталь, чугун, цветные металлы), но практического применения в качестве твердых смазок в условиях ЦПГ не получил. В работе [6]

авторами настоящей статьи представлена конкретизированная для жидких смазочных масел судового назначения рецептура трибологически эффективной присадки. Кинематическая вязкость используемых смазочных масел в данном случае составляет 10-20,5 мм<sup>2</sup>/с. Для проверки эффективности данной присадки противоизносного действия в условиях истирания материалов, характерных для ЦПГ судового двигателя и судовых циркуляционных смазочных масел различной вязкости необходимо проведение расширенного трибологического эксперимента на изнашивание данных материалов. Основными переменными характеристиками данного эксперимента будут являться вязкость смазочных масел, к которым добавляется присадка с содержанием диселенида молибдена MoSe<sub>2</sub> и жирных ненасыщенных кислот (олеиновой и стеариновой) по [6], концентрация указанной присадки по объему смазочного масла и нагрузка на испытательные образцы, формирующая различную площадь контакта.

### 1. Постановка задачи исследования

Основными задачами трибологического эксперимента являются получение величин изнашивания смазанных поверхностей образцов, вырезанных из реальных деталей судового ЦПГ (компрессионного кольца и цилиндрической гильзы) в функции времени  $h = f(t)$ , а также получение величин поперечной силы сопротивления движению смазанных образцов относительно друг друга. На основании расчета последнего показателя – силы сопротивления движению образцов  $F$ ,  $N$  возможен расчет коэффициента трения по выражению, учитывающему долю граничного трения поверхностей близкой к 100% [2]:

$$F = N \cdot f, N \quad (1)$$

где  $N$  – нормальная сила давления неподвижного образца трения на подвижный,  $N$ ;  $f$  – коэффициент трения в условиях истирания образцов.

Прикладной задачей эксперимента является сравнение расчетного выражения, определенного для трения ЦПГ судовых двигателей из [7] Ю.Н. Дроздовым с результатами выражения по (1) при известной силе нормального нагружения образцов  $N$ :

$$f = 0,021g(p_z \cdot \pi \cdot D \cdot h_k \cdot HB / v \cdot c_m \cdot S \cdot E_{пр}) \quad (2)$$

где  $p_z$  – давление сгорания, МПа;  $D$  – диаметр рабочего цилиндра, м;  $h_k$  – высота поршневого кольца, м;  $HB$  – твердость материала кольца;  $v$  – кинематическая вязкость масла, м<sup>2</sup>/с;  $c_m$  – скорость движения поршневого кольца, м/с;  $S$  – ход поршня, м;  $E_{пр}$  – приведенный коэффициент упругости, МПа.

Изнашивание материалов образцов, м, имитирующих поршневое кольцо и цилиндрическую гильзу замеряется весовым способом и рассчитываются по эмпирическому выражению Арчарда [8]:

$$h_s = kq_n S / 3HB \quad (3)$$

где  $k$  – отношение числа приводящих к износу фрикционных связей к полному числу последних (эмпирическая константа для каждой пары материалов);  $q_n$  – контактное давление по Герцу, МПа;  $S$  – линейный износ при контакте поверхностей;  $HB$  – твердость материала изнашиваемой поверхности по Бриннелю.

В выражении (3) показатель  $k$  определяется из расчетного выражения [9]:

$$5,4[(1-\mu^2)^4 HB^5 / \Delta^2 E^4] < P_c < 14,5[(1-\mu^2)^4 HB^5 / \Delta^2 E^4] \quad (4)$$

где  $P_c$  – контурное давление в области контакта поршневого кольца и рабочего цилиндра, МПа;  $HB$  – твердость изнашиваемого материала по Бриннелю;  $\Delta$  – комплексный показатель шероховатости поверхности;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости, МПа.

При этом контурное давление, МПа в области трибологического контакта рассчитывается как:

$$P_c = 1,87E^{0,5}(a_w/L_w)^{0,5} \cdot P_a^{0,5} \quad (5)$$

где  $a_w$  – высота волны шероховатости, мкм;  $L_w$  – шаг волны шероховатости, мкм;  $P_a$  – номинальное контактное давление, условно равное максимальному давлению сгорания цикла работы двигателя  $p_z$ , МПа.

Линейный износ при контакте поверхностей трения (подвижного и неподвижного испытательного образцов) находится по следующему расчетному выражению:

$$S = (\Delta m / \rho) / A \quad (6)$$

где  $\Delta m$  – массовый износ материала испытательных образцов,  $N$ ;  $\rho = 77000 \text{ Н/м}^3$  – плотность материалов чугунных образцов;  $A = 4,4885 \cdot 10^{-5}$  – контактная площадь соприкосновения образцов при трении поверхностей, м<sup>2</sup>.

### 2. Подготовка к экспериментальным исследованиям

#### 2.1. Выбор значений переменных параметров и числа этапов исследования

В качестве переменных параметров исследования в различных сочетаниях между собой выступают следующие: вязкость смазочной среды  $V_i$ , объемная концентрация (наличие в смазочной среде) противоизносной присадки по [6]  $C_i$ , нормальная нагрузка на неподвижном образце  $P_i$ , имитирующая при известной площади контакта образцов давление сгорания в ЦПГ. Все значения приведенных переменных параметров для 12 этапов исследования приведены в таблице 1. Значения постоянных параметров исследования приведены в таблице 2.

В таблице 3 приведены основные трибологические и реологические характеристики используемых смазочных масел.

Вязкость испытываемых смазочных материалов измерялась капиллярно-вискозиметрическим методом с помощью вискозиметра ВПЖ-2 для всех проб, используемых в каждом из 12 этапов трибологического исследования.

Таблица 1

**Значения переменных параметров исследования на всех этапах трибологического исследования**

№	Составляющие режима испытания	Нормальная нагрузка $N_i$ , Н	Объемная концентрация противоизносной присадки по [ ] в смазочном масле $C_i$ , %	Вязкость смазочного масла (кинематическая) $V_i$ , мм <sup>2</sup> /с	Используемое смазочное масло (обозначение по ГОСТ 12337-84)
1	$C_1N_1V_1$	22,5	1,0	16,5	M14B2
2	$C_1N_2V_1$	38,25	1,0	16,5	M14B2
3	$C_1N_3V_1$	54	1,0	16,5	M14B2
4	$C_1N_1V_2$	22,5	1,0	17	M14B2
5	$C_1N_2V_2$	38,25	1,0	17	M14B2
6	$C_1N_3V_2$	54	1,0	17	M14B2
7	$C_0N_1V_1$	22,5	0	13,5	M16Г2ЦС
8	$C_0N_2V_1$	38,25	0	13,5	M16Г2ЦС
9	$C_0N_3V_1$	54	0	13,5	M16Г2ЦС
10	$C_0N_1V_2$	22,5	0	14	M16Г2ЦС
11	$C_0N_2V_2$	38,25	0	14	M16Г2ЦС
12	$C_0N_3V_2$	54	0	14	M16Г2ЦС

Таблица 2

**Значения постоянных параметров исследования на всех этапах трибологического исследования**

№	Составляющие режима испытания	Мощность приводного электродвигателя $P$ , кВт	Частота вращения кривошипного вала $n$ , об/мин	Температура, поддерживаемая в термостатической камере $T$ , °С	Путь трения за этап исследования $s$ , м
1	$C_1N_1V_1$	0,8	1440±10	150	38154,24
2	$C_1N_2V_1$	0,8	1440±10	150	38154,24
3	$C_1N_3V_1$	0,8	1440±10	150	38154,24
4	$C_1N_1V_2$	0,8	1440±10	150	38154,24
5	$C_1N_2V_2$	0,8	1440±10	150	38154,24
6	$C_1N_3V_2$	0,8	1440±10	150	38154,24
7	$C_0N_1V_1$	0,8	1440±10	150	38154,24
8	$C_0N_2V_1$	0,8	1440±10	150	38154,24
9	$C_0N_3V_1$	0,8	1440±10	150	38154,24
10	$C_0N_1V_2$	0,8	1440±10	150	38154,24
11	$C_0N_2V_2$	0,8	1440±10	150	38154,24
12	$C_0N_3V_2$	0,8	1440±10	150	38154,24

Таблица 3

**Реологические и трибологические характеристики испытываемых смазочных масел**

Наименование	M14B2 (ГОСТ 12337-84)	MC-16Г2ЦС (ГОСТ 12337-84)
Вязкость кинематическая при 100°С, мм <sup>2</sup> /с	13,5-14,5	15,5-17
Плотность при 20°С, кг/м <sup>3</sup>	910	
Индекс задиорообразования, Н	370	340
Критическая нагрузка, Н	784	823
Показатель изнашиваемости при постоянной нагрузке 196 Н	0,4	

2.2. Техническая характеристика машины трения возвратно-поступательного типа

Машина трения представляет собой научно-исследовательскую установку, схема которой представлена на рисунке 1. От приводного электродвигателя 1 через кривошипный вал 2 и шатун 3 вращательное движение преобразуется в возвратно-поступательное движение тележки 8, посредством гладкого штока 4 и двухопорной направляющей 5. Тележка 8 соединена со штоком

4 пластиной 6 и изгибающейся двухопорной тензометрической балкой 7. Тележка 8 с подвижным образцом 10 перемещается в герметичной термостатической камере 13, закрывающейся верхней шарнирной крышкой. Роль опоры тележки 8 в камере 13 выполняют две пары роликов 9. Процесс истирания производится в смазочной среде между подвижным образцом 10 и неподвижным 11. Последний поджат шарнирной штангой нагружения 12 с набором мерных грузов на одном из концов.

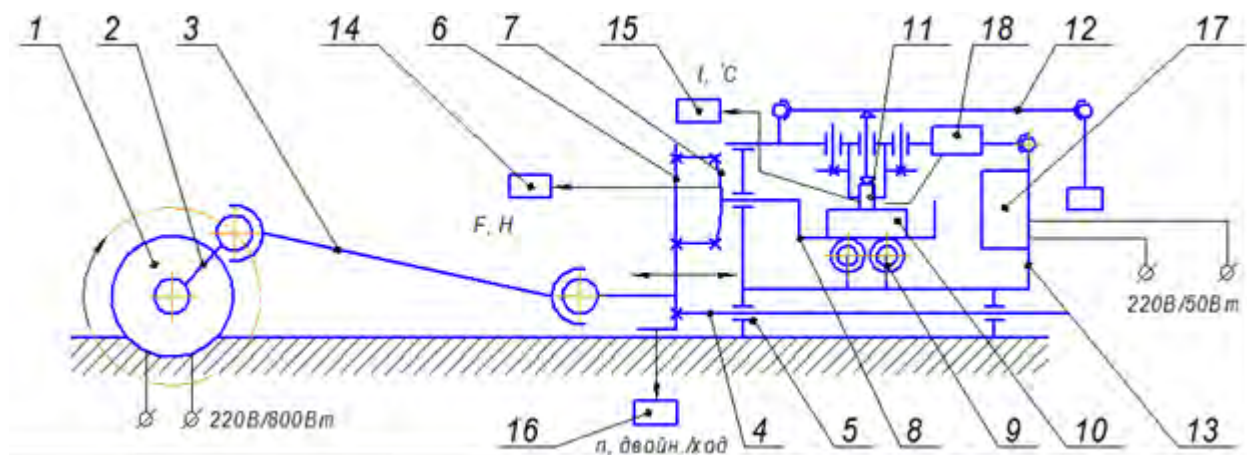


Рис. 1. Схема машины трения

Смазывание образцов выполняется специальным дозирующим устройством 18 со скоростью истечения жидкого масла, равной 5 см<sup>3</sup>/ч. Нагрев термостатической камеры 13 выполняется посредством двух терморезистивных элементов 17. Температура истирания образцов 10 и 11 в зоне контакта регистрируется посредством термпары, встроенной в неподвижный образец 11 и регистрирующего аналого-цифрового устройства 15. Сила сопротивления движению образца 10 при трении с образцом 11 регистрируется тензометрическим датчиком, наклеенным на силомерную балку 7 и аналого-цифровым преобразователем 14. Число двойных возвратно-поступательных ходов штока 4 и пластины 6 регистрируется посредством аналого-цифрового

устройства 16, получающего электрический сигнал от индуктивного датчика, закрепленного на пластине 6. Смазочное масло, стекающее с подвижного образца 10 при его возвратно-поступательном движении, удаляется из термостатической камеры 13 через капиллярные дренажные отверстия в ее нижней части. Строгое поступательное движение неподвижного образца 11 вниз по направлению к подвижному 10 выполняется посредством двух гладких направляющих штоков в шарнирной крышке, закрывающей камеру 13.

Основные технические характеристики машины трения представлены в таблице 4, основные характеристики силомерного устройства (балки 6) представлены в таблице 5.

Таблица 4

Технические характеристики машины трения

Наименование	Единица измерения	Значение
Тип взаимного движения образцов	-	Возвратно-поступательный
Мощность приводного электродвигателя N	Вт	800
Частота вращения кривошипного вала n	об/мин	1440±10
Число двойных ходов тележки в единицу времени n <sub>2</sub>	двойной ход/с	24
Величина хода движения тележки подвижного образца S	мм	36,8±0,05
Соотношение радиуса кривошипа R и длины шатуна l (λ=R/l)	-	0,22
Максимальная нагрузка на упор неподвижного образца на консольной стреле штанги нагружения	Н	100
Дискретность отсчета регистрирующего устройства для термпары C	°C	1
Мощность тепловых излучателей термостатирующего резистора N <sub>T</sub>	Вт	50
Величина поддерживаемой в камере температуры t	°C	200
Соотношение плеч балки нагружения (упорное l <sub>1</sub> /консольное l <sub>2</sub> )	мм	10/295
Габаритные размеры установки (длина L/ширина B/высота H)	мм	500/500/450



Таблица 5

**Характеристики тензометрического датчика и силомерной балки**

Наименование	Единица измерения	Значение
1	2	3
Материал силомерной балки	-	Сталь инструментальная
Модуль Юнга для материала балки E	Н/м <sup>2</sup>	196·10 <sup>9</sup>
Предел прочности материала балки s	Н/м <sup>2</sup>	127·10 <sup>7</sup>
Максимальная стрела прогиба балки в средней точке λ	мм	1,05±0,01
Чувствительность тензорезистора S <sub>k</sub>	-	2,0
Материал подложки/измерительной решетки тензорезистора	-	Полиамид/константановая фольга
База измерительной решетки тензорезистора A	мм	9,5
Температурный коэффициент чувствительности тензорезистора k <sub>t</sub>	1/К	115·10 <sup>-6</sup>
Поперечная чувствительность тензорезистора	%	0,1
Температурный диапазон работы тензорезистора при динамических измерениях D <sub>T</sub>	°С	-200...+200
Номинальное сопротивление тензорезистора R	Ом	120
Используемая схема подключения тензорезисторов на силомерной балке	-	Полумостовая, термокомпенсированная
Напряжение питания датчиков силомерной балки U	В	9
База заделки силомерной балки в опорах L	мм	70
Размеры силомерной балки в поперечном сечении: шир. A/выс. B	мм	11,9/0,75

Основные характеристики образцов 10 и 11 (рисунок 1), истирающихся в жидкой смазочной

среде и их внешний вид приведены на рисунке 2 и в таблице 6.

Таблица 6

**Основные размеры и масса образцов для противоизносных испытаний**

Наименование параметра	Обозначение на рисунке	Величина
Неподвижный образец (вытянутая трапеция)		
Ширина поперечной части	l	9,55±0,05
Высота неистираемой части	h <sub>0</sub>	7,5±0,05
Высота образца общая	h <sub>1</sub>	9,65±0,05
Длина нижней части	b <sub>1</sub>	4,7±0,05
Длина верхней части	b <sub>2</sub>	6,1±0,05
Радиус скругления нижнего (истираемого) основания	r	0,18±0,05
Масса образца	m <sub>0н</sub>	4,32±0,01
Подвижный образец (параллелепипед)		
Длина продольной части	l	80,25±0,05
Поперечная ширина	b	14,05±0,05
Высота образца	h	9,05±0,05
Радиус скругления верхнего (истираемого) основания	r	0,18±0,05
Масса образца	m <sub>0п</sub>	78,57±0,01

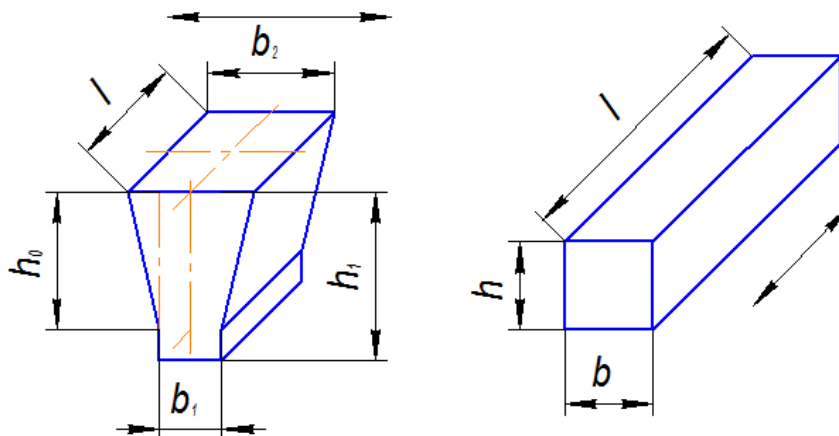


Рис.2. Форма образцов для противоизносных испытаний и их размеры (знакопеременным стрелками показано направление истирания)

### 3. Проведение трибологических испытаний

Технология проведения каждого цикла трибологических противоизносных испытаний на указанной в п. 2.2 установке с одним из смазочных материалов (в качестве объектов испытания по 12 этапам согласно таблицам 1 и 2) в режиме возвратно-поступательного движения образцов заключалась в следующем:

1. Подготовка образцов, имитирующих детали цилиндропоршневой группы: поршневое кольцо и рабочую цилиндрическую гильзу. В качестве имитирующих образцов выступали вырезанные сегменты указанных деталей ЦПГ судового среднеоборотного дизеля 6ЧР36/45 (Г60). Рабочая частота вращения коленчатого вала последнего  $n=360\pm 10$  об/мин, мощность  $N=736$  кВт при диаметре цилиндра  $D=360$  мм и ходе поршня  $S=450$  мм. Материалом образца в форме параллелепипеда (рис. 2) для цилиндрической гильзы являлся серый легированный чугун СЧ25 (ГОСТ 1412-85) с добавкой фосфора и хрома. Кольцо имитирует неподвижный образец – вытянутая равносторонняя трапеция (рис. 2), вырезанная из поршневого кольца двигателя 6ЧР36/45 (Г60). Материал неподвижного образца А-ХМ с защитным покрытием из хрома. По окончании подготовки образцов для каждого цикла испытания их взвешивают раздельно друг от друга с точностью 0,01 г на весах OMRON-100D с пределом измерения 100 г.

2. Закладка образцов в державки машины трения и подача смазочного масла из дозатора в зону трения образцов в объеме  $5 \text{ см}^3/\text{ч}$ .

3. Включение контура имитации тепловой нагрузки с прогреванием образцов в термокамере в течение 10 мин.

4. Пуск пропульсивного комплекса установки (кривошипно-шатунной и крейцкопфной группы) в ход и выполнение непрерывного цикла испытаний в течении 360 мин.

5. Остановка пропульсивного комплекса машины трения и снятие образцов с державок.

6. Промывка образцов в бензине с целью удаления продуктов износа с поверхностей трения.

7. Взвешивание подвижного и неподвижного образцов на электронных лабораторных весах OMRON-100D раздельно друг от друга с точностью 0,01 г.

Подобная последовательность действий осуществляется с каждым объектом испытания – каждым из заявленных смазочных материалов.

### 4. Результаты трибологических испытаний

Проведенные трибологические испытания, основной целью которых являлось сравнение противоизносных характеристик двух масел разной вязкости из таблицы 3 и их аналогов с добавкой присадки на основе диселенида молибдена по [6] показали следующие результаты (таблицы 7, 8 и 9). Обозначение этапов исследования в таблицах 7-9 и таблице 1 совпадают. В таблице 7 приведены результаты противоизносных испытаний (абсолютный и относительный износ образцов по рисунку 2 на машине трения (рис.1)).

В таблице 9 приведены результаты расчетов коэффициента трения  $f$  по выражению (2) и сравнение их с расчетными показателями на основании замеренной силы сопротивления взаимного движения образцов  $F$ ,  $N$  по выражению (1). Последнее расчетное выражение является актуальным для расчета коэффициента трения в условиях граничного или полусухого трибологического контакта поверхностей испытательных образцов.

Таблица 7

**Результаты противоизносных испытаний и соотношение износов подвижного и неподвижного образцов**

№	Составляющие режима испытания	Износ образцов, г			Взаимное соотношение износа для образцов, %:	
		неподвижного	подвижного	общий	неподвижного	подвижного
1	C <sub>1</sub> P <sub>1</sub> V <sub>1</sub>	0,03	0,03	0,06	50	50
2	C <sub>1</sub> P <sub>2</sub> V <sub>1</sub>	0,03	0,03	0,06	50	50
3	C <sub>1</sub> P <sub>3</sub> V <sub>1</sub>	0,04	0,03	0,07	57,14	42,86
4	C <sub>1</sub> P <sub>1</sub> V <sub>2</sub>	0,05	0,04	0,09	55,56	44,44
5	C <sub>1</sub> P <sub>2</sub> V <sub>2</sub>	0,05	0,05	0,1	50	50
6	C <sub>1</sub> P <sub>3</sub> V <sub>2</sub>	0,06	0,05	0,11	54,55	45,45
7	C <sub>0</sub> P <sub>1</sub> V <sub>1</sub>	0,07	0,05	0,12	58,33	41,67
8	C <sub>0</sub> P <sub>2</sub> V <sub>1</sub>	0,09	0,06	0,15	60	40
9	C <sub>0</sub> P <sub>3</sub> V <sub>1</sub>	0,1	0,07	0,17	58,82	41,18
10	C <sub>0</sub> P <sub>1</sub> V <sub>2</sub>	0,11	0,08	0,19	57,89	42,11
11	C <sub>0</sub> P <sub>2</sub> V <sub>2</sub>	0,13	0,09	0,22	59,09	40,91
12	C <sub>0</sub> P <sub>3</sub> V <sub>2</sub>	0,16	0,08	0,24	66,67	33,33

Таблица 8

**Линейные износы испытательных образцов, рассчитанные по выражениям (3) и (6)**

№	Составляющие режима испытания	Контактное давление $q_n$ , МПа	Линейный износ образцов $S$ , м, рассчитанный по (6)		Линейный износ образцов $h$ , м, рассчитанный по (3)	
			неподвижного	подвижного	неподвижного	подвижного
1	2	3	4	5	6	7
1	$C_1P_1V_1$	0,5	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$
2	$C_1P_2V_1$	0,85	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-8}$	$5,8 \cdot 10^{-8}$
3	$C_1P_3V_1$	1,2	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$8,2 \cdot 10^{-8}$
4	$C_1P_1V_2$	0,5	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$11,6 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-8}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$
5	$C_1P_2V_2$	0,85	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$14,5 \cdot 10^{-4}$	$9,7 \cdot 10^{-8}$	$9,7 \cdot 10^{-8}$
6	$C_1P_3V_2$	1,2	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$14,5 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$
7	$C_0P_1V_1$	0,5	$2 \cdot 10^{-4}$	$14,5 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$5,7 \cdot 10^{-8}$
8	$C_0P_2V_1$	0,85	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$17,4 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$
9	$C_0P_3V_1$	1,2	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$20,3 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$
10	$C_0P_1V_2$	0,5	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$23 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$9,1 \cdot 10^{-8}$
11	$C_0P_2V_2$	0,85	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$26 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$
12	$C_0P_3V_2$	1,2	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$23 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$

В таблице 8 дополнительно приведены результаты расчета по (6) линейного натурального износа  $S$ , м каждого образца на основании измеренного весового  $\Delta m$ , Н и результаты расчета линейного износа  $h$ , м по выражению (3). В расчетном выражении (6) твердость каждого из образцов принята в пределах  $HB=127 \cdot 10^7$  Па, контактное давление  $q_n=N/A$ , где  $N$  – нормальная сила нагрузки по условиям этапа трибологического исследования,  $A=4,49 \cdot 10^{-5}$ , м – является площадью контакта испытательных образцов. По условию

напряженного упруго-насыщенного контакта число безразмерное число  $k$ , учитывающее доминирующий вид разрушающего контакта следует принимать не менее 3 [9].

В таблице 9, кроме того, приведена относительная ошибка расчетов (2) по сравнению с реальным полученным коэффициентом трения  $f$  по (1) и приведена замеренная тензометрическим способом величина силы  $F$ , Н сопротивления относительно движению образцов.

Таблица 9

**Результаты расчета коэффициента трения  $f$  по (2) и (1) и силы трения  $F$  между образцами**

№	Составляющие режима испытания	Контактное давление $q_n$ , МПа	Коэффициент трения $f$		Относительная погрешность расчетов, %	Сила трения $F$ , Н
			рассчитанный по (2)	рассчитанный по (1) с участием значения силы $F$		
1	$C_1P_1V_1$	0,5	0,127	0,12	5,57	2,64
2	$C_1P_2V_1$	0,85	0,13	0,124	4,71	4,63
3	$C_1P_3V_1$	1,2	0,131	0,128	2,19	7,06
4	$C_1P_1V_2$	0,5	0,125	0,118	5,62	2,60
5	$C_1P_2V_2$	0,85	0,128	0,122	4,75	4,56
6	$C_1P_3V_2$	1,2	0,129	0,125	3,71	6,72
7	$C_0P_1V_1$	0,5	0,127	0,12	5,63	2,63
8	$C_0P_2V_1$	0,85	0,129	0,122	5,47	4,58
9	$C_0P_3V_1$	1,2	0,131	0,127	3,01	6,98
10	$C_0P_1V_2$	0,5	0,125	0,122	2,49	2,68
11	$C_0P_2V_2$	0,85	0,127	0,125	1,65	4,73
12	$C_0P_3V_2$	1,2	0,129	0,128	0,70	7,04

**Выводы**

По результатам проведенных трибологических исследований и противоизносных испытаний могут быть сделаны следующие основные выводы:

1. Содержание противоизносной присадки, в основе которой лежит твердосмазочное вещество типа дихалькогенида тугоплавкого материала –

диселенид молибдена – в жидком смазочном масле значительно снижает износ подвижных трибологических сопряжений, в качестве которых выступили сегменты деталей ЦПГ судового дизельного двигателя. При этом форсирование режимов изнашивания (скорости движения образцов) по сравнению с реальной частотой вращения двигателя 6ЧР36/45 в 3,8-4 раза, а также

уменьшение пути знакопеременного движения при трении более чем в 12,2 раз показывает эффективность противоизносных свойств присадки по [6] при все возрастающем шаге контактного давления  $q_n$  на неподвижный образец. В целом, согласно результатам, приведенным в таблицах 7 и 8 весовой износ и линейный путь изнашивания  $h$  снижаются для неподвижного образца в 2,3-2,7 раз в зависимости от возрастающего шага контактного давления, для подвижного – в 1,6-1,67 раз. Возможной причиной этому является выстраивание на гранично-трущихся поверхностях образцов тонкой, но физически прочной пленки из твердосмазочной составляющей присадки [6] – диселенида молибдена с прочной молекулярной структурой. Очевидным является и тот факт, что возможность выстраивания данного защитного слоя по высоте, полностью перекрывающей высоту микронеровностей трущихся поверхностей, не является безграничной и не позволяет защитной пленки постоянно нарастать.

2. При использовании рассматриваемой противоизносной присадки доля износа между образцами в 3 этапах исследования из 6 возможных практически выравнивается, в остальных случаях держится в пределах 43-46% для подвижного образца относительно неподвижного. Для 6 этапов исследования без внесения присадки [6] в состав смазочного материала следует отметить большую неравномерность распределения износа между трущимися поверхностями образцов и большой износ неподвижного трапецеидального образца – от 58 до 67 % в общем показателе износа образцов. Связать указанную полученную закономерность возможно с наличием устойчивой защитной пленки из твердосмазочного материала, которая в силу правильной ориентации структуры приповерхностного слоя активных молекул ненасыщенных кислот – олеиновой и стеариновой – содержащихся в составе исследуемой противоизносной присадки. Молекулярная составляющая тонкого защитного слоя из этих кислот способна стабилизировать удержание молекул диселенида молибдена на поверхности трения в широком диапазоне температур (200-280<sup>o</sup>C по регистрирующей термопаре. Кроме того, в случае отсутствия присадки [6] в составе основного смазочного материала наблюдалось повышение контактной температуры на поверхностях трения – до 300-315<sup>o</sup>C, что говорит о невысокой термостабильности образуемых защитных слоев для обычного средневязкого судового масла типа M16Г2ЦС или M14В.

3. При повышении вязкости используемого смазочного масла, а также вариации вязкости за счет внесения в состав масла до 1,0 объемного % противоизносной присадки на основе диселенида молибдена наблюдается снижение коэффициента трения  $f$  как по результатам замеренных сил трения на тензометрической балке, так и по результатам расчетов согласно выражения (2) Ю. Н. Дроздова из [7]. Однако для этапов исследования, в которых принимали участие не модифицированные присадкой масла наблюдается обратный эффект как в расчетном виде, так и с реальными силами трения – коэффициент трения  $f$  не снижается при росте вязкости, а наоборот растет. Данный эффект можно объяснить тем, что твердосмазочная составляющая в объеме масла снижает его гидродинамические возможности на граничном и полужидкостном контакте, в то время как для стандартного масла именно вязкость является определяющим фактором в вариации затрат на трение при полужидкостном и граничном контакте микронеровностями трущихся поверхностей.

4. Повышение вязкости масел и в случае использования присадки [6] и при ее отсутствии в составе смазочного масла дает однозначный эффект повышения весового износа. Износ растет пропорционально вязкости масла и вместе с тем – пропорционально шагу приложенного к контактирующей поверхности давления  $q_n$ . Это возможно объяснить повышением затрат на сопротивление сдвигу смазочных слоев, разделяющих трущиеся поверхности при возрастании вязкости масла. В случае использования присадки с содержанием диселенида молибдена ожидаем эффект полного исключения полужидкостного трения и вступления в защитное действие именно твердых и одновременно пластичных слоев дихалькогенида молибдена и развитие чисто граничного механизма трения поверхностей.

5. Ошибка относительного характера в расчетах коэффициента трения  $f$  по выражению Ю. Н. Дроздова по (2) и при ожидаемом граничном механизме трения (1) не превышает 0,7-5,7 %, что говорит о высокой сходимости расчетных и экспериментальных результатов трибологического исследования, однако для повышения точности расчетов безразмерных коэффициентов необходимо введение в классическое выражение (2) соответствующих корректирующих коэффициентов путем последовательного исключения неизвестных или другими статистическими методиками.

#### Литература

1. Марченко Е.А., Лобова Т.А. Использование дихалькогенидов тугоплавких металлов для обеспечения стабильности работы узлов трения // Вестник научно-технического развития. – 2009. – №5 (21). – С. 16-21.
2. Воронков Б.Д. Подшипники сухого трения // Л.: Машиностроение. – 1968. – 140 с.
3. Марченко Е.А. О механизме изнашивания диселенида молибдена // Трение и износ. – 2000. – №4. – Т. 21. – С. 438-443.
4. Марченко Е.А., Лобова Т.А. Взаимодействие поверхностей трения со смазочными материалами типа 2Н-МоS<sub>2</sub> // Трение и износ. – 2008. – №4. – Т. 29. – С. 391-398.
5. Долгополов К.Н., Любимов Д.Н., Пономаренко А.Г., Чигаренко Г.Г., Бойко М.В. Структура смазочных слоев, формирующихся в присутствии присадок минеральных модификаторов трения // Трение и износ. – 2009. – №5. – Т. 30. – С. 516-521.

6. Пат. 2570643 Российская Федерация, МПК С10М 169/04, С10М 125/22 / Противоизносная присадка. А.П. Перекрестов, Ю.Н. Дроздов, В.А. Чанчиков, И.Н. Гужвенко, С.А. Свекольников; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «АГТУ» - заявл. 22.07.2014; опубл. 10.12.2015, Бюл. №34. – 5 с.
7. Клемушин Ф.М. К расчету износа цилиндрических втулок дизелей // Трение и износ. – 1980. – №5. – Т. 1. – С. 864-868.
8. Путинцев С.В. Механические потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчетов, испытаний // М.: МГТУ им. Баумана. – 2011. – 288 с.
9. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ // М.: Машиностроение. – 1977. – 526 с.

#### References

1. Marchenko E.A., Lobova T.A. Ispol'zovaniye dikhal'kogenidov tugoplavkikh metallov dlya obespecheniya stabil'nosti raboty uzlov treniya // Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya. – 2009. – №5 (21). – S. 16-21.
2. Voronkov B.D. Podshipniki sukhogo treniya // L.: Mashinostroeniye. – 1968. – 140 s.
3. Marchenko E.A. O mekhanizme iznashivaniya diselenida molibdena // Trenie i iznos. – 2000. – №4. – Т. 21. – S. 438-443.
4. Marchenko E.A., Lobova T.A. Vzaimodeystvie poverkhnostey treniya so smazochnymi materialami tipa 2N-MoS<sub>2</sub> // Trenie i iznos. – 2008. – №4. – Т. 29. – S. 391-398.
5. Dolgopolov K.N., Lyubimov D.N., Ponomarenko A.G., Chigarev G.G., Boyko M.V. Struktura smazochnykh sloev, formiruyushchikh v prisutstvii prisadok mineral'nykh modifikatorov treniya // Trenie i iznos. – 2009. – №5. – Т. 30. – S. 516-521.
6. Пат. 2570643 Rossiyskaya Federatsiya, MPK S10M 169/04, S10M 125/22 / Protivoiznosnaya prisadka. A.P. Perekrstov, YU.N. Drozdov, V.A. Chanchikov, I.N. Guzhvenko, S.A. Svekol'nikov; zayavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO «AGTU» - zayavl. 22.07.2014; opubl. 10.12.2015, Byul. №34. – 5 s.
7. Klemushin F.M. K raschetu iznosa tsilindrovnykh vtulok dizeley // Trenie i iznos. – 1980. – №5. – Т. 1. – S. 864-868.
8. Putintsev S.V. Mekhanicheskiye poteri v porshnevykh dvigatelyakh: spetsial'nyye glavy konstruirovaniya, raschetov, ispytaniy // M.: MGTU im. Baumana. – 2011. – 288 s.
9. Kragel'skiy I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Osnovy raschetov na treniye i iznos // M.: Mashinostroyeniye. – 1977. – 526 s.

## **ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

УДК 004.932.2, 519.25, 004.93

### **МЕТОД ПОРОГОВОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ МОРСКИХ СУДОВ**

**Шакиб Субхиевич Фахми**

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории интеллектуальных транспортных систем

Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13

Тел.: +7(812) 321-95-68

профессор кафедры систем автоматизированного проектирования

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус I, помещение 11-53

Тел.: +7(812) 234-36-75

e-mail: shakeebf@mail.ru

**Святослав Александрович Селиверстов**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории интеллектуальных транспортных систем

Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13

Тел.: +7(812) 321-95-68

Кафедра компьютерных систем и программных технологий, Институт компьютерных наук и технологий

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21

Тел.: +7 (812) 297-16-28

e-mail: seliverstov\_s\_a@mail.ru

**Виктор Викторович Вислогузов**

кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории интеллектуальных транспортных систем

Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук

199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13

Тел.: +7(812) 321-95-68

e-mail: vviktor72@mail.ru

**Виталий Вячеславович Крымский**

кандидат экономических наук, доцент, заместитель начальника кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ

Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России

196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д.149

Тел.: +7(978) 031-03-00

e-mail: kvv-1982@yandex.ru

#### **Аннотация**

Обнаружение и распознавание судов имеют важное значение для интеллектуального мониторинга судов с целью эффективного управления ресурсами порта. Однако, нестационарность источников изображений: сложные профили судна, фона судна, окклюзии объекта, изменение погодных и световых условий делает задачу распознавания морских объектов практически труднорешаемой. В работе рассматривается новый метод обнаружения и сегментации изображений морских судов на основе многоуровневого порогового анализа гистограммы яркостей пикселей исходного изображения в реальном времени. Предложены математические модели для осуществления многоуровневой сегментации и кластеризации с использованием алгоритмов статистического дисперсионного анализа остаточной (внутригрупповой) и факторной (межгрупповой) дисперсий. Приведены результаты тестирования предложенного метода при обработке изображений судов различных классов, полученных со спутников, беспилотников и специальных вышек видеонаблюдения за акваторией морских портов. Рассчитаны количественные показатели эффективности систем сегментации изображений морских судов: скорость обработки и средняя сложность вычислительных затрат.

**Ключевые слова:** Изображения морских судов, сегментация, гистограмма, остаточная и факторная дисперсии.

## **THE THRESHOLD SEGMENTATION METHOD OF SEA SHIPS IMAGES**

**Shakeeb S. Fahmi**

Dr.Tech.Sc, docent, Leading researcher

Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,

199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13

Tel.: +7(812) 321-95-68,  
 Professor of Department of Computer Aided Design Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"  
 197376 St. Petersburg, 5, Professora Popova Street

Tel.: +7(812) 234-36-75  
 e-mail: shakeebf@mail.ru

**Svyatoslav A. Seliverstov**

Phd, Senior researcher,

Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,  
 199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13 Tel: (812) 321-95-68

Department of Computer Systems & Software Engineering

Institute of Computer Science and Technology

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya, 21

e-mail: seliverstov\_s\_a@mail.ru

**Victor V. Visloguzov**

Phd, Associate Professor, Leading Researcher

Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,

199178, St. Petersburg, V.O. 12 line, 13 Tel: (812) 321-95-68

e-mail: vvviktor72@mail.ru

**Vitalii V. Krymskii**

candidate of economic Sciences, associate Professor, Deputy head of the Department of firefighting and rescue operations

St. Petersburg University of emergency situations Ministry of Russia

196105, St. Petersburg, Moskovsky pr., 149, Tel: +7(978) 031-03-00

e-mail: kvv-1982@yandex.ru

#### Abstract

Vessel detection and recognition are essential for intelligent vessel monitoring to effectively manage port resources. However, the unsteadiness of image sources: complex ship profiles, ship background, object occlusions, changes in weather and light conditions make the task of recognition of marine objects almost intractable. In this paper we consider a new method of detection and segmentation of images of ships based on a multi-level threshold analysis of the histogram brightness pixels of the original image in real time. Mathematical models are proposed for multilevel segmentation and clustering using algorithms for statistical analysis of variance of residual (intragroup) and factor (intergroup) variances. The results of testing the proposed method for processing images of ships of different classes obtained from satellites, drones and special video surveillance towers over the waters of seaports are presented. The quantitative indicators of efficiency of segmentation systems of images of ships are calculated: processing speed and average complexity of computational costs.

**Key words:** Images of ships, segmentation, histogram, residual and factor dispersion.

#### Введение

Вектор развития транспорта в РФ хорошо отмечен в работе [1]: «Сегодня в России развитие транспортной сферы требует реализации интенсивных подходов, связанных с интеллектуализацией ее организации. Это позволит обеспечить более полное использование ресурсов транспортной инфраструктуры, а значит, приведет к расширению спектра транспортных услуг с одновременным повышением их качества. Для реализации указанного направления создается интеллектуальная мультимодальная транспортная система (ИМТС) как симбиоз технологий двух видов: транспортных и инфотелекоммуникационных».

С развитием морской экономики морские перевозки и управление привлекают все больше внимания в современных портах [2]. Обнаружение и распознавание судов играют важную роль в управлении морскими перевозками. Для выполнения задач обнаружения и распознавания судов хорошим выбором является видеонаблюдение со статическими камерами. Камеры наблюдения все чаще развертываются для управления портами и обеспечения безопасности, чтобы реализовать интеллектуальный порт [3,4].

Тем не менее, это является сложной задачей из-за сложных профилей судна, фона судна и окклюзий объектов, изменений погодных и световых условий и других проблем.

В последнее время актуальным стало использование технологии глубокого обучения [4], предоставляющую перспективное направление для решения выше указанных задач. Распознавание объектов на изображениях, полученных различных источников наблюдения путём пороговой сегментации является самым популярным и эффективным подходом в обработке изображений для идентификации требуемых объектов, т.к. позволяет получить лучшие результаты точного распознавания объектов в условия шума и помех. Например, в работе [5] использована технология «сверточные нейронные сети глубокого обучения» (*Deep Convolutional Neural Networks*) для распознавания китайских автомобильных номерных знаков из дорожных видеороликов. Однако, данная технология требует огромных вычислительных и временных ресурсов, что делает её практически не реализуемой для эффективного функционирования в реальном времени.

Автоматизированное извлечение полезной информации из изображений со сложной структурой с применением адаптивной

сегментации изображений является одной из актуальных на сегодняшний день способов обработки и анализа изображений и стало популярной и активной областью исследований на протяжении последних нескольких десятилетий [6,7]. Сегментация делит изображение на составляющие его области или объекты и она позволяет извлекать и распознавать объекты на изображениях с относительно минимальной задержкой.

Пороговая сегментация изображений – это процесс разделения изображения на различные области, основанный на анализ значений яркостей пикселей путём сравнения с заданным порогом (*threshold*) [8,9]. При этом поиск подходящего значения порога яркости должен быть выполнен на основе гистограммы распределения вероятностей яркостей пикселей и позволяет классификацию, разделив исходное изображение на две (и более) области: фон и объект. В результате такого разделения каждая область будет представлена набором пикселей и изолирована от остальной части сцены, следовательно, цель состоит в том, чтобы найти оптимальное значение порога, позволяющее наилучшим образом выделить требуемые объекты от фона с учетом функций распределения интенсивности пикселей.

### 1. Постановка задачи пороговой сегментации

Наиболее часто встречающийся способ выбора оптимального значения порога сегментации – это фиксация значения границы оттенков серого в качестве порога путём проверки текущего значения яркости пиксела выше или ниже заданного уровня яркости [10]. Порог должен находиться в глобальном минимуме гистограммы для обеспечения операции среза исходного изображения с помощью управляющей бинарной маски. После вычисления значений порогов для сегментации, необходимо выполнить переход обратно от фрагментов гистограммы к сегментам изображения одновременно с фильтрацией и удалением шумов и помех для четкого выделения границ и уровней яркости морского судна (МС).

Следует подчеркнуть, для четкого изображения, гистограмма имеет глобальный минимум между двумя пиками распределения яркостей пикселей (рис. 1). Поэтому оптимальное пороговое значение можно найти в интервале между пиками в области минимумов на гистограмме распределения яркостей пикселей [11].

На практике часто гистограмма изображений МС имеет мультимодальный характер распределения, т.е. несколько пиков на гистограмме (рис. 1), и для сегментации предложенный алгоритм должен учитывать каждый из четко выраженных максимумов (вершин пиков). Чтобы найти подходящий порог необходимо определить пики на гистограмме, затем осуществить поиск минимумов – границ на основе вычисления остаточной и факторной дисперсий статистического анализа сцены [12].

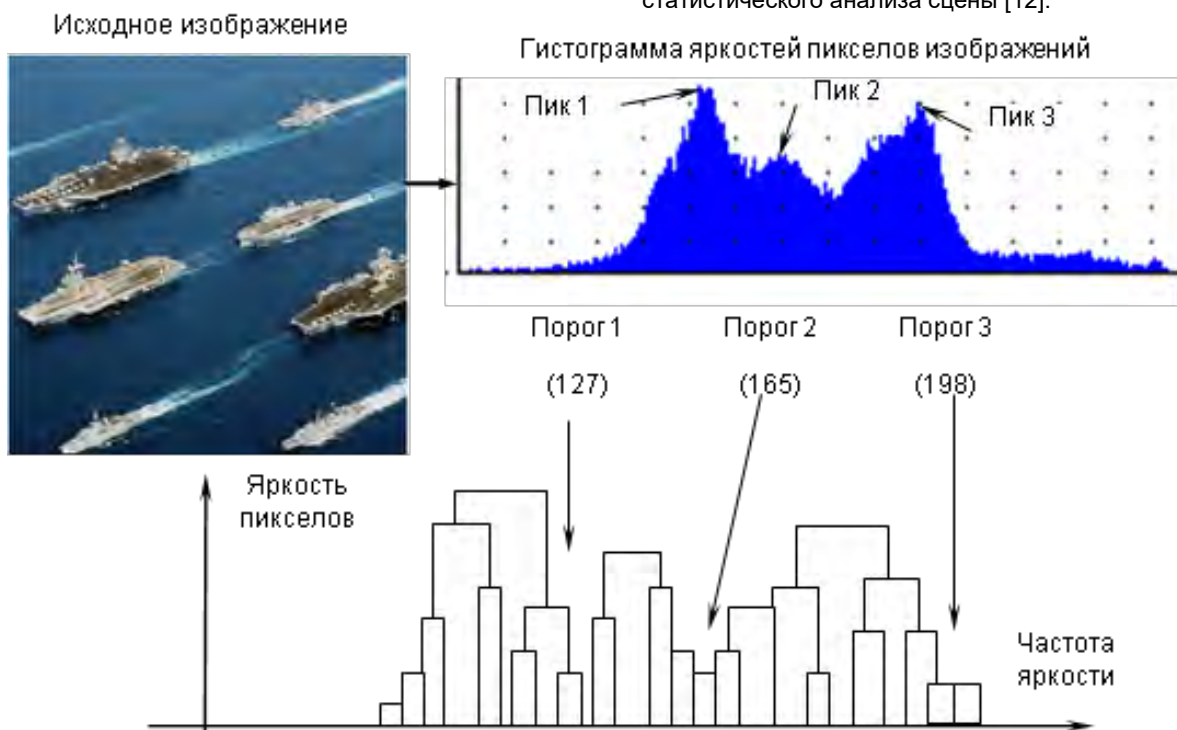


Рис. 1. Гистограмма изображения и дендрограмма формирования порогов



Для реализации алгоритма поиска порога на основе концепции подобия между уровнями серого допускаются следующие предположения:

а) существует значительный контраст между объектами и фоном;

б) наличие максимумов (мод) на гистограмме и изображений является полутоновым.

Теоретически оптимальное пороговое значение может быть определено по правилу Байеса, если известно распределение пикселей обоих классов [9].

Например, если гистограмма имеет только один пик, то сегментация представляет собой разделение изображения на две области: МС (требуемый объект) и фон (не объект). Однако, часто на практике на гистограмме имеет место быть более двух пиков распределений (рис. 2). Два, три и четыре пика и часто они перекрываются и почти невозможно определить оптимальную границу между пиками из-за плавного характера перехода между пиками, следовательно, задача разделения объекта от фона становится сложной и для её решения необходима дополнительная математико-статистическая обработка, основанная на учете дисперсии и формы распределений областей изображений и с учетом класса и специфики каждого виденотока [13, 14].

## 2. Принцип пороговой сегментации изображений

Нахождение порогового значения гистограммы по группировочным данным средних значений яркостей пикселей является самым простым способом реализации сегментации изображений. Из изображения в оттенках серого можно использовать пороговое значение для создания двоичных изображений (так называемых бинарных). Двоичные изображения создаются из цветных изображений путем присвоения каждого пикселя исходного изображения двум или более классам. Если существует более двух областей, то обычный результат имеет несколько оттенков серого в зависимости от числа мод в гистограмме изображения. В обработке изображений пороговое значение используется для разбиения изображения на более мелкие сегменты или блоки, используя по крайней мере одно значение цветовой или серой шкалы для определения их границы.

Преимущество получения первого бинарного изображения заключается в том, что оно снижает

сложность данных и упрощает процесс распознавания и классификации. Наиболее распространенным способом преобразования изображения уровня серого в двоичное изображение является выбор одного порогового значения ( $T$ ) [15].

Входными данными для операции поиска порогового значения обычно являются оттенки серого или цветное изображение. В простейшей реализации выход представляет собой двоичное изображение, представляющее сегментацию. Черные пиксели соответствуют фону, а белые - переднему плану - объекту (или наоборот). Этот метод сегментации применяет один фиксированный критерий ко всем пикселям изображения одновременно [16].

Процедура простой сегментации заключается в следующем:

Исходное изображение рассматривается как множество пикселей с яркостями  $f(x, y)$ , где  $x, y$  - геометрические координаты пикселя в пределах изображений,  $g(x, y)$  - значение яркости выходного пикселя. Для сегментации изображений по яркости необходимо выполнить следующее:

$g(x, y) = 1$ , если  $f(x, y)$  - пиксель переднего плана (объект) и  $g(x, y) = 0$ , если  $f(x, y)$  - пиксель заднего плана (фон).

В реальных приложениях гистограммы более сложны, со многими пиками и в условиях шума и помех, что затрудняет оптимального выбора значение границы областей ( $T$ ):

$$g(x,y)=0, \text{ если } f(x,y)<T; g(x,y)=1, \text{ если } f(x,y)\geq T. \quad (1)$$

Эту технику можно выразить так:

$$T=T[x, y, p(x, y), F(x, y)]$$

Где  $f(x, y)$  - уровень серого, а  $p(x, y)$  - некоторое локальное свойство МС.

$F(x,y)>T$  означает, что пиксель принадлежит объекту, иначе он принадлежит фону [16].

Существует три типа алгоритмов порогового значения.

- глобальное пороговое значение (Global);
- локальное пороговое значение (Thres);
- адаптивное пороговое значение (Adaptive).

В адаптивном пороговом определении используются различные пороговые значения для различных локальных областей:

а) *Глобальное Пороговое Значение.*

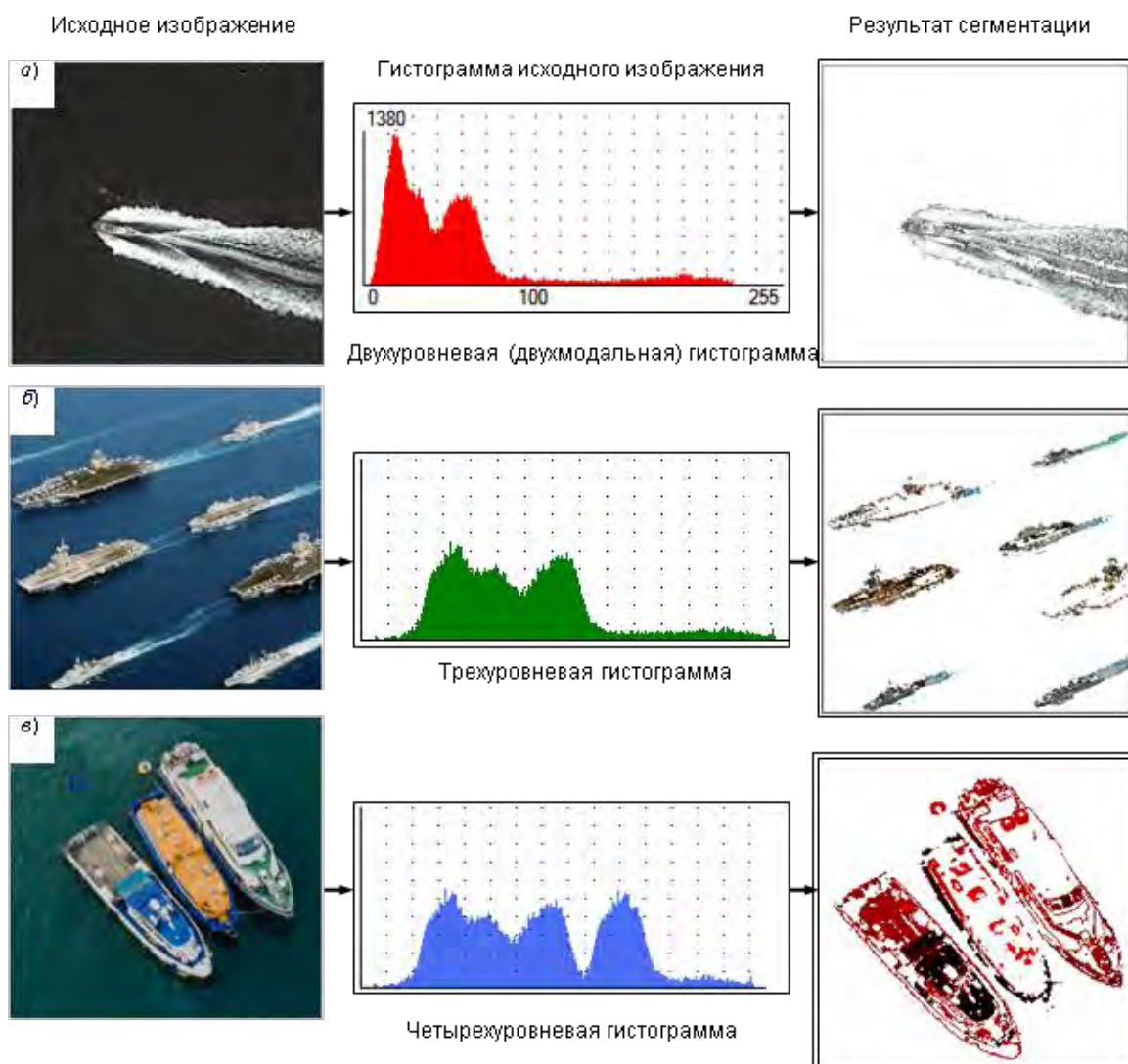


Рис. 2. Сегментации изображений морских судов: а) двухпиковая гистограмма; б) трехпиковая гистограмма и в) четырехпиковой гистограммы распределений яркостей

Глобальный порог применяется, когда распределение интенсивности объектов и фоновых пикселей достаточно различны. В глобальном порогом одно пороговое значение используется во всем изображении. Глобальный порог был популярным методом в течение многих лет [17-19]. Когда значения пикселей компонентов и фона достаточно согласованы в своих соответствующих значениях по всему изображению, можно использовать глобальное пороговое значение.

Глобальное пороговое значение заключается в выборе порогового значения  $T$ , отделяющего объект от фона. Если  $g(x, y)$  является пороговой версией  $f(x, y)$  при некотором глобальном порогом  $T$ ,

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } f(x, y) \geq T, \\ 0, & \text{если } f(x, y) < T. \end{cases} \quad (2)$$

Существует ряд глобальных методов порогового значения, таких как: Otsu, оптимальное пороговое значение, анализ гистограммы, итерационное пороговое значение, максимальное корреляционное пороговое значение,

кластеризация, мультиспектральное и многозначное значение.

б) Выбор порога на основе гистограммы методы, основанные на гистограмме, зависят от успеха оценки порогового значения, которое разделяет две однородные области переднего плана и фона изображения.

Данный алгоритм подходит для изображения с большой однородностью и будет разделять области, где все области объектов и фона являются однородными и за исключением области между объектами и фоном.

Пороговое значение на основе гистограммы применяется для получения всех возможных однородных областей на изображении [20].

Пусть  $P1$  и  $P2$ -серое значение пиков гистограммы. Пороговое значение  $T$  задается формулой:

$$T = (P1 + P2) / 2.$$

Или может быть серый уровень минимума между двумя пиками.

$T = \min H(u)$  и  $U \in [P1, P2]$ , где  $H(u)$  - значение гистограммы на уровне серого  $u$  между  $P1$  и  $P2$

Методы, основанные на гистограмме, зависят от успеха оценки порогового значения, которое разделяет две однородные области объекта и фона изображения.

в) *Выбор порога на основе итерационного*

Итерационные методы дают лучший результат, когда гистограмма четко не определяет точку долины. Этот метод не требует каких-либо специальных знаний об изображении. Итерационный метод имеет возможность улучшить антишумовые возможности и основан на апостериорном среднем значении серого ниже и выше предыдущего порогового значения по гистограмме. Этот итерационный алгоритм является специальным одномерным случаем кластеризации К-средних, сходящимся на локальном минимуме. Но главный недостаток заключается в том, что метод сильно чувствителен к шумам и помехам изображений [21, 22].

Существую много методов определения порогов, например на основе корреляции [23] и с применением энтропии гистограммы распределения вероятностей яркостей пикселей исходного изображений [24], на основе алгоритма Otsu [25].

**3. Математический аппарат предложенного метода выделения морских объектов**

Пусть пиксели данного изображения представлены в  $L$  серых уровнях [1, 2, ...,  $L$ ]. Число пикселей на уровне  $i$  обозначается  $n_i$ , а общее число пикселей  $N = n_1 + n_2 + \dots + n_L$  для упрощения гистограмма серого уровня нормализуется и рассматривается как распределение вероятностей:

$$p_i = \frac{n_i}{N}, \sum p_i = 1.$$

Теперь предположим, что исходное изображение имеет две области (объект-корабль и не объект-фон), тогда необходимо разделить пиксели на два класса  $C_0$  и  $C_1$  (фон и объекты или наоборот) с порогом на уровне  $k$ ;  $C_0$  обозначает пиксели с уровнями [1, ...,  $k$ ], а  $C_1$  – пиксели с уровнями [ $k + 1$ , ...,  $L$ ]. Тогда вероятности возникновения класса и средние уровни класса, соответственно, задаются:

$$\begin{aligned} \omega_0 &= P_r(C_0) = \sum_{i=0}^k p_i = \omega(k), \\ \omega_1 &= P_r(C_1) = \sum_{i=n+1}^L p_i = 1 - \omega(k), \end{aligned}$$

и,

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^k iP_r\left(\frac{i}{C_0}\right) = \sum_{i=1}^k \frac{ip_i}{\omega_0} = \frac{\mu(k)}{\omega(k)}, \tag{1}$$

$$\mu_1 = \sum_{i=k+1}^L iP_r\left(\frac{i}{C_1}\right) = \sum_{i=k+1}^L \frac{ip_i}{\omega_1} = \frac{\mu_T - \mu(k)}{1 - \omega(k)}, \tag{2}$$

где

$$\omega(k) = \sum_{i=0}^k p_i \text{ и } \mu(k) = \sum_{i=0}^k ip_i$$

- нулевые и накопительные моменты первого порядка гистограммы до  $k$ -го уровня,

соответственно,  $\mu_T = \mu(L) = \sum_{i=0}^L ip_i$  – общая

средняя интенсивность яркости исходного изображения, где  $i$  – значение яркости, а  $p_i$  – вероятность появления  $i$ -ой яркости на изображении.

Можно легко проверить следующее соотношение для любого выбора  $k$ :

$$\omega_0\mu_0 + \omega_1\mu_1 = \mu_T, \omega_0 + \omega_1 = 1$$

Отклонения в классе задаются:

$$\sigma_0^2 = \sum_{i=0}^k (i - \mu_0)^2 P_r\left(\frac{i}{C_0}\right) = \sum_{i=0}^k (i - \mu_0)^2 p_i \left(\frac{i}{\omega_0}\right),$$

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=k+1}^L (i - \mu_1)^2 P_r\left(\frac{i}{C_1}\right) = \sum_{i=k+1}^L (i - \mu_1)^2 p_i \left(\frac{i}{\omega_1}\right),$$

(3)

Они требуют кумулятивных моментов второго порядка (статистики). Для оценки «точности» порога (на уровне  $k$ ) введем следующие дискриминантные критериальные меры (или меры классовой отделимости), используемые в дискриминантном анализе [7]:

$$\lambda = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_W^2}, \quad k = \frac{\sigma_T^2}{\sigma_W^2}, \quad \mu = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_T^2}, \tag{4}$$

где

$$\sigma_W^2 = \omega_0\sigma_0^2 + \omega_1\sigma_1^2,$$

$$\sigma_B^2 = \omega_0(\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu_T)^2 = \omega_0\omega_1(\mu_1 - \mu_0)^2, \tag{5}$$

$$(\omega_0 + \omega_1 = 1),$$

Формулы:

$$\omega_0\mu_0 + \omega_1\mu_1 = \mu_T, \omega_0 + \omega_1 = 1,$$

$$\sigma_T^2 = \sum_{i=k+1}^L (1 - \mu_T)^2 p_i,$$

являются дисперсией внутри класса, дисперсией между классами и общей дисперсией уровней соответственно. Тогда наша задача сводится к задаче оптимизации для поиска порога  $k$ , который максимизирует одну из объектных функций (критерий меры) по формуле (3). Эта точка зрения мотивирована гипотезой о том, что хорошо обмолоченные классы будут разделены на серые уровни, и, наоборот, порог, дающий лучшее разделение классов на серых уровнях, будет лучшим порогом.

Дискриминантные критерии максимизирующие  $\lambda$  по формуле (4)  $k$  и  $\mu$  соответственно, при этом эквивалентны друг другу  $k = \lambda + 1$  и  $\mu = \lambda/(\lambda + 1)$  в терминах  $\lambda$ , поскольку всегда выполняется следующее основное соотношение:

$$\sigma_B^2 + \sigma_W^2 = \sigma_T^2.$$

Замечено, что  $\sigma_B^2$  и  $\sigma_W^2$  являются функциями порогового уровня  $k$ , но  $\sigma_T^2$  не зависит от  $k$ . Также отмечается, что  $\sigma_W^2$  основывается на статистике второго порядка (дисперсии классов), а  $\sigma_B^2$  на статистике первого порядка (средние классы). Поэтому  $\eta$  является простейшей мерой по

отношению к  $k$ . Таким образом, можно принимать  $\eta$  в качестве критерия для оценки «точности» (или отделимости) порога на уровне  $k$ .

Оптимальный порог  $k^*$ , который максимизирует  $\eta$  или эквивалентно максимизирует  $\sigma_B^2$ , выбирается в следующем последовательном поиске по формуле (3) с использованием простых кумулятивных величин (2) или (1):

$$\mu(k) = \frac{\sigma_B^2(k)}{\sigma_T^2},$$

$$\mu(k) = \frac{[\mu_T \omega(k) - \mu(k)]^2}{\omega(k)[1 - \omega(k)]}, \quad (6)$$

и оптимальный порог  $k^*$  является:

$$\sigma_B^2(k^*) = \max \sigma_B^2(k), \text{ при } i \leq k < L.$$

Из задачи диапазон  $k$ , по которому ищется максимум, может быть ограничен:

$$S^* = \{k; \omega_0 \omega_1 = \omega(k)[1 - \omega(k)] > 0, 0 < \omega(k) < 1\}$$

назовем его эффективным диапазоном гистограммы серого уровня.

Из формул в (5) и (6) критериальная мера  $\sigma_B^2$  (или  $\eta$ ) принимает минимальное значение нуля для такого  $k$ , где  $k \in S - S^* = \{k; \omega(k) = 0 \text{ или } 1\}$  (т.е. делает все пиксели либо  $C_1$ , либо  $C_0$ , следовательно, результат всегда принимает положительное и ограниченное значение для  $k \in S^*$  и максимум всегда существует).

#### 4. Методика формирования оптимального порога

Проблема многоуровневого порога и анализа гистограммы тесно связаны с проблемой кластеризации, и с точным определением границ разделения изображения на несколько классов [26]. В данной работе используется итеративное объединение кластеров для формирования дендрограммы на основе автоматического объединения попарно соседних групп (однородные области по яркости) гистограммы полутонового изображения (рис. 2).

Три Гауссовых кластера с сильно отличающейся кривизной порождают проблему в интерпретации принадлежности пикселей.

Изначально предполагается, что каждому уровню серого присваивается определенный кластер. Если в изображении используется  $K$  уровней серого, то можно предположить, что существует  $K$  классов:  $C_1, C_2, \dots, C_K$ , т.е. на изображении имеется  $T_k$  уровней серого соответствующие  $C_k$  кластерам, и удовлетворяющие условию  $T_1 < T_2 < \dots < T_K$ . Для удобства описания параметров системы сегментации изображений МС добавим  $T_0 = 0$ .

Для определения расстояния между двумя распределениями  $A$  и  $B$ , определяемые как функцию  $d(AB)$  на гистограмме используется дискриминантный анализ [9]. Чем меньше значение расстояния, тем лучше пара яркостей пикселей для слияния. Поэтому ближайшая пара по значению яркости определяется как пара, которую можно объединить. Поскольку алгоритм порогового значения может быть обобщен для решения

многоуровневой пороговой задачи, исходную задачу можно считать многоуровневой пороговой задачей [16].

*Методика объединения яркостей по гистограмме изображений.*

Для работы алгоритма, необходимо установить начальные значения для интервала яркостей исходного полутонового изображения  $1 \leq k \leq K$  следующим образом:

–  $P_n = P_r(C_n)$  – вероятность класса  $n$ . При этом

$$\text{известно, что } \sum_{k=1}^K P_k = 1,$$

–  $P_r(z|C_n)$  – функция плотности вероятности уровня серого  $z$  в классе  $n$ . Значение интенсивности пикселей  $z$  находится в диапазоне  $[0, L-1]$ .

Алгоритм пороговой обработки включает:

1. вычисление среднего значения кластера  $k$ ,  $m_k = T_k$ , где  $m_k$  – номер шага  $k$ -го кластера,  $P_k = h(T_k)$ , где  $h(z)$  – функция плотности вероятности  $z$ ;

2. вычисление расстояния между соседними кластерами, обозначенными  $k_1$  и  $k_2$  следующим образом:

$$Dist_{k_1 k_2} = \frac{P_{k_1} P_{k_2} [m_{k_1} - m_{k_2}]^2}{\sigma_{k_1 k_2}^2}$$

где  $\sigma_{k_1 k_2}^2$  – общая дисперсия кластеров  $k_1$  и  $k_2$ , если они объединены.

$$M_{k_1 k_2} = \frac{P_{k_1} m_{k_1} + P_{k_2} m_{k_2}}{P_{k_1} + P_{k_2}},$$

$$m_k = \sum_{z=T_{k-1}+1}^{T_k} z P_r\left(\frac{z}{C_k}\right) = \frac{1}{P_k} \sum_{z=T_{k-1}+1}^{T_k} zh(z),$$

$$P_k = P_r(C_k) = \sum_{z=T_{k-1}+1}^{T_k} h(z),$$

$$\sigma_{k_1 k_2}^2 = \sum_{z=T_{k-1}+1}^{T_k} [z - M_{k_1 k_2}]^2 h(z),$$

где  $M_{k_1 k_2}$  – среднее значение объединенных кластеров  $k_1$  и  $k_2$ .

3. нахождение наиболее похожих кластеров  $k_i$  и  $k_j$ , где  $i < j$ , выбрав наименьшее значение вычисленного расстояния. Объединение кластеров  $k_i$  и  $k_j$ , и формирование вместо них кластера  $k_i$  и назначить  $T_j$  с  $T_j + 1$  для любого  $j > i$ . На заключительном этапе получим два кластера с пороговым значением  $T_i$ .

4. перейти к пунктам 2 – 3 и выполнить их в общей сложности  $K-2$  раз, алгоритм закончен.

#### 5. Результаты моделирования предложенного метода

Для оценки эффективности предложенного метода сегментации применяем изображения морских судов 4-х классов (рис. 1 а – г): а) МС со спутника ДЗЗ б) МС в порту в) МС из вышки видеонаблюдения и г) МС из беспилотника (рис. 1 а – д). Разработка и тестирования программ моделирования алгоритмов проводились на языке C++ среды Visual C++ для Visual Studio 2015. В результате тестирования были получены следующие количественные оценки (таблица):

- $f_1$  – число изображений, подвергавшихся обработке;
- $f_2$  – скорость обработки (сек) и указана в интервале ( $min - max$ );
- $f_3$  – сложность алгоритма (операции/пиксел) и указана в интервале ( $min - max$ );
- $f_4$  – средняя вычислительная сложность.

Таблица. Результаты моделирования и оценка алгоритмов сегментации

Видеопотоки	Количественные оценки алгоритмов сегментации изображений морских судов			
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$
а) МС со спутника ДЗЗ	430	$(12-37) \cdot 10^{-3}$	26 – 36	29
б) МС из береговой камеры наблюдения на фоне горизонта	320	$(7-18) \cdot 10^{-3}$	17 – 33	34
г) МС из вышки наблюдения на фоне берега	250	$(29-49) \cdot 10^{-3}$	23 – 35	39
в) МС из беспилотника	200	$(67-87) \cdot 10^{-3}$	17 – 28	28

Из этих экспериментальных результатов можно заключить, что предлагаемый метод выделения границ МС обеспечивает лучшую производительность, то есть переход к обработке видеoinформации возможен, где требуется не менее 25 кадров в секунду.

### Заключение

Распознавание изображения морских судов считаются одной из серьезных научных задач [27-31], решение которой, определяет качество современных видео систем при обеспечении безопасности работы портов с интенсивным движением различных судов для многих развитых морских стран. Поэтому, чтобы обеспечить соответствующие инфраструктуры необходимой технологией обнаружения и распознавания

потребуется вкладывать в инвестирование научных работ интеллектуализации и увеличить продвижение НИОКР по применению современных методов сегментации для реализации высокопроизводительных систем распознавания морских объектов. В данной работе проведены исследования по обнаружению и качественному выделению границ требуемых морских объектов – судов, полученных из различных источников видеонаблюдения.

Разработаны программное обеспечение, математический аппарат и алгоритм для определения оптимального порога уровня полутоновых мультимодальных изображений с использованием дисперсионного анализа. Предложенный метод, на основе сходства уровней серого позволяет выделить границы морских объектов в сложных условиях шума и помех многоуровневого порога, следовательно, избежать проблемы выбора порога при локальных минимумах.

Важной особенностью предложенного метода заключается в том, что использование дисперсионного анализа позволяет учесть различные геометрические и амплитудные характеристики морских судов (формы и размер носовой, каюты и кормы корабля и т.д.), которые позволяют уменьшить вероятности ложной тревоги без уменьшения вероятности правильного обнаружения кораблей. При этом исследования показали, что система обнаружения судов в цветовых видеопоследовательностях эффективна, т.к. используется информация, полученная как через цветовые, так и временные вариации видеопотока морских судов в реальном времени.

В заключение нужно отметить, что трехуровневый порог раскрывает больше информации об изображениях по сравнению с двухуровневым порогом сегментации. Таким образом, можно предположить, что детализация изображений будет увеличиваться с увеличением уровня порога. В перспективу целесообразно рассмотреть некоторые другие усовершенствованные алгоритмы многоуровневой пороговой сегментации с целью достижения более высокого качества разделения объектов от фона при детализации и выявлении мелких объектов изображений.

### Литература

1. Комашинский В. И., Малыгин И. Г., Аванесов М. Ю. и др. Концептуальные подходы к построению интеллектуальной мультимодальной транспортной системы РФ // Информация и космос. 2016. № 3 . С. 8–16.
2. Wang, Z.; Tang,W.; Zhao, L. Research on the modern port logistics development in the city-group, China. In Proceedings of the 2010 International Conference on IEEE Logistics Systems and Intelligent Management (ICLSIM), Harbin, China, 9–10 January 2010; pp. 1280–1283.
3. Alderton, P.M. Port Management and Operations; Harbors: Suffolk, NY, USA, 2008.
4. Xu, L.; Ren, J.S.J.; Liu, C.; Jia, J. Deep convolutional neural network for image deconvolution. In Proceedings of the International Conference on Neural Information Processing Systems, Montreal, QC, Canada, 8–13 December 2014; pp. 1790–1798.
5. Zang, D.; Chai, Z.; Zhang, J.; Zhang, D.; Cheng, J. Vehicle license plate recognition using visual attention model and deep learning. J. Electron. Imaging 2015, 24.
6. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Крюкова М.С. Выделение контуров морских объектов на основе пирамидально-рекурсивного метода представления изображений// Морские интеллектуальные технологии. № 2 (44). Т.2. 2019. С.129–137. (ИФ 0,197)
7. Фахми, Ш.С. Выделение контуров изображений морских судов// Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Селиверстов Я.А., Калинина Е.С., Иванов А.В./ Морские интеллектуальные технологии. № 3 (45). Т.3. 2019. С.132–143.

8. R.C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital Image Processing. Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
9. Yunzhi J., Song D., Chia-Ling H., Jun Y., Yinglong W., Huojiao H. Multi-threshold image segmentation using histogram thresholding-Bayesian honey bee mating algorithm/ 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation. DOI: 10.1109/CEC.2015.7257227.
10. Фахми, Ш.С. Гибридный метод преобразования изображений морских судов// Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Селиверстов С.А., Хасан Я.А., Абдулжаббар Н.-Т.М., Иванов А.В./Морские интеллектуальные технологии. № 3 (45). Т.3. 2019. С.121–132.
11. O.J. Tobias and R. Seara, "Image segmentation by histogram thresholding using fuzzy sets", IEEE Trans. On Image Processing, vol. 11, pp. 1457-1465, 2002.
12. Шаталова Н.В., Фахми Ш.С., Алексеенко Я.В., Ермаков Е.П. Видеоисистемы на кристалле обнаружения лесных пожаров. В сборнике: ТРАНСПОРТ РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ - 2016 материалы Международной научно-практической конференции. 2016. С. 252 - 259.
13. Шаталова Н.В., Фахми Ш.С., Мукало Ю.И., Гаврилов И.А. Обнаружение и распознавание транспортных средств. В сборнике: ТРАНСПОРТ РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ - 2016. Материалы Международной научно-практической конференции. 2016. С. 187-193.
14. Фахми Ш.С. Полигональная рекурсивная обработка видеoinформации. Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2008. № 1. С. 42-51.
15. SalemSaleh Al-Amri1, N.V. Kalyankar2 And KhamitkarS.D"Image Segmentation By Using Threshold Techniques", Journal Of Computing, Vol.2issue 5, Pp. 83-86, 2010.
16. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
17. A.S. Abutaleb, "Automatic Thresholding Of Gray-Level Pictures Using Two Dimensional Entropy", Computer Vision, Graphics, And Image Processing, Vol.47, Pp.22-32, 1989.
18. J. Kittler and J. Illingworth, "Minimum Error Thresholding", Pattern Recognition, Vol.19, No.1, Pp.41-47, 1986.
19. K.H. Liang And J.J.W Mao, "Image Thresholding By Minimizing The Measures Of Fuzziness", Pattern Recognition, Vol.28, No.1, Pp.41-51, 1995.
20. Khang Siang Tan, Nor Ashidi Mat Isa, " Color Image Segmentation Using Histogram Thresholding-Fuzzy C-Means Hybrid Approach", Pattern Recognition, Vol44,Pp 1-15, 2011.
21. T.Ridler and C.Calvard, Thresholding using an Iterative Selection Methods,IEEE,Trans.on Systems,Man,andCybern.,Vol.SMC-8,pp.630-632,1978.
22. H.J. Trussell: Comments on 'Picture Thresh-olding using an Iterative Selection Method ', IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybern., Vol. SMC-9, p. 311, 1979.
23. I. Chseke and Z. Fazekas: Comments on gray-level thresholding of images using a correlation criterion, Pattern Recognition Letters, Vol 11, pp. 709-710, 1990.
24. T. Pun, A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram, Signal Process. 2, 1980, 223-237.
25. N. Ostu, A threshold selection method from gray-level histogram, IEEE Trans. Systems Man Cybemet. SMC-8, 1978, 62-66.
26. Фахми Ш.С. Методы, алгоритмы кодирования и классификация изображений морских судов/ М.С. Крюкова, Хасан Я.А., Ш.С. Фахми, и др.// Морские интеллектуальные технологии. № 1 (43). Т.3. 2019. С.145–155.
27. Фахми Ш.С., Костикова Е.В., Крюкова М.С., Селиверстов С.А. Видеосистема обнаружения морских судов по триангуляционным решёткам. Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-3 (41). С. 143-155.
28. Бобровский А.И., Еид М.М., Костикова Е.В., Салем А., Алмахрук М.М., Фахми Ш.С. Выделение и хранение опорных точек изображений на основе динамических рекурсивных структур. Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2016. № 3. С. 99-107.
29. Фахми Ш.С., Еид М.М., Бобровский А.И., Гаврилов И.А., Мукало Ю.И., Альмахрук М., Салем А. Систематизация алгоритмов нахождения и кодирования опорных точек изображений. Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2017. № 3. С. 15-20.
30. Таранцев А.А., Фахми Ш.С., Шаталова Н.В. Принципы математического описания логических схем. Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 2-2 (40). С. 162-169.
31. Бобровский А.И., Алексеенко Я.В., Фахми Ш.С. Реализация параллельной обработки видеoinформации на основе пространственно-рекурсивного метода. Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2015. № 5. С. 89-96.

#### References

1. Komashinsky V. I., Malygin I. G., Avanesov M. Yu., etc. Conceptual approaches to the construction of intelligent multimodal transport system of the Russian Federation // Information and space. 2016. No. 3 . P. 8-16.
2. Wang, Z.; Tang,W.; Zhao, L. Research on the modern port logistics development in the city-group, China. In Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management (ICLSIM), Harbin, China, 9-10 January 2010; pp. 1280-1283.
3. Alderton, P. M. Port Management and Operations; Harbors Suffolk, NY, USA, 2008.
4. Xu, L.; Ren, J. S. J.; Liu, C.; Jia, J. Deep convolutional neural network for image deconvolution. In Proceedings of the International Conference on Neural Information Processing Systems, Montreal, QC, Canada, 8-13 December 2014; pp. 1790-1798.
5. Zang, D.; Chai, Z.; Zhang, J.; Zhang, D.; Cheng, J. Vehicle license plate recognition using visual attention model and deep learning. J. Electron. Imaging 2015, 24.

6. Fahmi sh. S., Shatalova N. V., Kryukova M. S. Allocation of contours of sea objects on the basis of pyramidal-recursive method of representation of images// Sea intellectual technologies. No. 2 (44). Vol.2. 2019. S. 129-137. (If 0.197 inch)
7. Fahmi, S. the Allocation of contours of images of marine vessels// Fahmi S. S., Shatalova N. In. Seliverstov Y. A., Kalinina E. S., Ivanov, A. V./ Marine intellectual technologies. No. 3 (45). Vol.3. 2019. P. 132-143.
8. R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital Image Processing. Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
9. Yunzhi J., Song D., Chia-Ling H., Jun Y., Yinglong W., Huojiao H. Multi-threshold image segmentation using histogram thresholding-Bayesian honey bee mating algorithm/ 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation. DOI: 10.1109/CEC.2015.7257227.
10. Fahmi, S. S. Hybrid method of image conversion of marine vessels// Fahmi S. S., Shatalova N. In. Seliverstov C. A., Hassan I. A., Abdel Jabbar, N.-T. M., Ivanov, A. V./Marine intellectual technologies. No. 3 (45). Vol.3. 2019. P. 121-132.
11. O. J. Tobias and R. Seara, "Image segmentation by histogram thresholding using fuzzy sets", IEEE Trans. On Image Processing, vol. 11, pp. 1457-1465, 2002.
12. Shatalova N. In. Fahmy S. S., Alekseenko I. V., Ermakova E. P. Videosysteme on-chip detection of forest fires. In the collection: TRANSPORT of RUSSIA: PROBLEMS and PROSPECTS-2016 proceedings of the International scientific and practical conference. 2016. P. 252 - 259.
13. Shatalova N. V., Fahmi sh. S., Mukalo Yu. I., Gavrilov I. A. Detection and recognition of vehicles. In the collection: TRANSPORT of RUSSIA: PROBLEMS and PROSPECTS-2016. Materials of the International scientific-practical conference. 2016. P. 187-193.
14. Fahmi S. S. Polygon recursive processing of video information. Questions of electronics. A series of: Technique television. 2008. No. 1. S. 42-51.
15. SalemSaleh Al-Amri1, N. V. Kalyankar2 And KhamitkarS.D"Image Segmentation By Using Threshold Techniques", Journal Of Computing, Vol.2issue 5, Pp. 83-86, 2010.
16. Gonzalez R., woods R. Digital image processing. - Moscow: Technosphere, 2006. – 1072 p.
17. A. S. Abutaleb, "Automatic Thresholding Of Gray-Level Pictures Using Two Dimensional Entropy", Computer Vision, Graphics, And Image Processing, Vol.47, Pp.22-32, 1989.
18. J. Kittler and J. Illingworth, "Minimum Error Thresholding", Pattern Recognition, Vol.19, No.1, Pp.41-47, 1986.
19. K. H. Liang And J. J. W Mao, "Image Thresholding By Minimizing The Measures Of Fuzziness", Pattern Recognition, Vol.28, No.1, Pp.41 to 51, 1995.
20. Khang Siang Tan, Nor Ashidi Mat Isa, " Color Image Segmentation Using Histogram Thresholding-Fuzzy C-Means Hybrid Approach", Pattern Recognition, Vol44,Pp 1-15, 2011.
21. T. C. Ridler and Calvard, Thresholding using an Iterative Selection Methods,IEEE Trans.on Systems,Man,andCybern.Vol.SMC-8,pp.630-632,1978.
22. H. J. Trussell: Comments on 'Picture Thresholding using an Iterative Selection Method ', IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybern. Vol. SMC-9, p. 311, 1979.
23. I. Chseke and Z. Fazekas: Comments on gray-level thresholding of images using a correlation criterion, Pattern Recognition Letters, Vol 11, pp. 709-710, 1990.
24. T. Pun, A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram, Signal Process. 2, 1980, 223-237.
25. N. Ostu, A threshold selection method from gray-level histogram, IEEE Trans. Systems Man Cybernet. SMC-8, 1978, 62-66.
26. Fahmi S. S. Techniques, coding algorithms and image classification of ships/ M. S. Kryukov, Y. A. Hassan, S. S. Fahmy, etc.// Marine intelligent technologies. No. 1 (43). Vol.3. 2019. S. 145-155.
27. Fahmi SH.S., Kostikova E.V., Kryukova M.S., Seliverstov S.A. Videosistema obnaruzheniya morskikh sudov po triangulyacionnym reshnyotkam. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-3 (41). S. 143-155.
28. Bobrovskij A.I., Eid M.M., Kostikova E.V., Salem A., Almahruk M.M., Fahmi SH.S. Vydelenie i hranenie opornykh toчек izobrazhenij na osnove dinamicheskikh rekursivnykh struktur. Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2016. № 3. S. 99-107.
29. Fahmi SH.S., Eid M.M., Bobrovskij A.I., Gavrilov I.A., Mukalo YU.I., Al'mahruk M., Salem A. Sistematizaciya algoritmov nahozhdeniya i kodirovaniya opornykh toчек izobrazhenij. Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2017. № 3. S. 15-20.
30. Tarancev A.A., Fahmi SH.S., SHatalova N.V. Principy matematicheskogo opisaniya logicheskikh skhem. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 2-2 (40). S. 162-169.
31. Bobrovskij A.I., Alekseenko YA.V., Fahmi SH.S. Realizaciya parallel'noj obrabotki videoinformacii na osnove prostranstvenno-rekursivnogo metoda. Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2015. № 5. S. 89-96.

## УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 656.62: 504.4.054

### ОЦЕНКА РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ НА РЕКАХ В ГРАНИЦАХ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

**Ольга Леонидовна Домнина**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры логистики и маркетинга  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: o-domnina@yandex.rul.ru

**Андрей Евгеньевич Пластинин**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: plastininae@yandex.ru

**Екатерина Александровна Батанина**

аспирант кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: ea-batanina@yandex.ru

**Виктор Степанович Наумов**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой охраны окружающей среды и производственной безопасности  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: naumov1@vgavt-nn.ru

#### Аннотация

В различных системах реагирования как международных, так и российских, предусматривается оценка рисков возникновения транспортных происшествий. В связи с отсутствием комплексных исследований в области построения математических моделей оценки экологического риска транспортных происшествий на объектах внутреннего водного транспорта авторами ранее была предложена методика оценки экологических рисков транспортных происшествий и математическая модель оценки экологического риска транспортных происшествий.

Цель представленного исследования: апробирование предложенной ранее математической модели на примере одного из крупнейших регионов Российской Федерации – республики Татарстан. В рамках реализации указанной цели были проведены: актуализация и анализ обновленных статистических данных по транспортным происшествиям, определены участки концентрации транспортных происшествий и по предложенной ранее авторами математической модели оценены риски транспортных происшествий на водных объектах республики Татарстан.

Основным результатом исследований является разработанная классификация участков концентрации транспортных происшествий в республике Татарстан по степени опасности в зависимости от уровня частоты возникновения аварийных ситуаций.

В дальнейшем предполагается выполнение картографирования рисков, оценка экологических рисков на внутренних водных путях России и сравнение полученных результатов с заложенными в существующих законодательных актах лимитами.

**Ключевые слова:** транспортные происшествия; экологический риск; экологическая безопасность; экологический ущерб; водный транспорт.

### RISK ASSESSMENT OF TRANSPORT ACCIDENTS ON RIVERS IN THE BORDERS OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN

**Olga L. Domnina**

the assoc. professor, Ph.D in Engineering Science,  
the assoc. professor, of the Department of Logistics and Marketing  
Volga State University of Water Transport,  
Nesterova St., 5, Nizhny Novgorod, 603951, Russian Federation  
e-mail: o-domnina@yandex.rul.ru

**Andrey E. Plastinin**

the assoc. professor, Dr.Sci.Tech.  
the professor of the Chair of Environmental Protection and Industrial Safety  
Volga State University of Water Transport  
Nesterova, 5, Nizhny Novgorod 603951, Russian Federation



e-mail: plastininae@yandex.ru

**Ekaterina A. Batanina**

Postgraduate student of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety  
Volga Sate University of Water Transport  
Nesterova, 5, Nizhny Novgorod 603951, Russian Federation  
e-mail: ea-batanina@yandex.ru

**Viktor S. Naumov**

the professor, Dr.Sci.Tech.  
the head of the Chair of Environmental Protection and Industrial Safety  
Volga Sate University of Water Transport  
Nesterova, 5, Nizhny Novgorod 603951, Russian Federation  
e-mail: naumov1@vgavt-nn.ru

#### Abstract

Various response systems, both international and Russian, provide the assessment of the risks of traffic accidents. Due to the lack of comprehensive research in the field of constructing mathematical models for assessing the environmental risk of transport accidents at inland waterway facilities, the authors previously proposed a methodology for assessing the environmental risks of transport accidents and a mathematical model for assessing the environmental risk of transport accidents.

The purpose of the study: testing the previously proposed mathematical model on the example of one of the largest regions of the Russian Federation - the Republic of Tatarstan. In the framework of the implementation of this goal, updating of statistical data on traffic accidents and analysis of the updated data were carried out, areas of concentration of traffic accidents were determined and the risks of traffic accidents at water bodies of the Republic of Tatarstan were estimated using the mathematical model previously proposed by the authors.

The main result of the research is the developed classification of traffic accident concentration sites in the Republic of Tatarstan according to the degree of danger depending on the level of frequency of emergency situations.

In the future, it is planned to carry out risk mapping, assess environmental risks on the inland waterways of Russia and compare the results obtained with the limits stipulated by existing legislative acts.

**Key words:** transport accidents; environmental risk; environmental safety; environmental damage; water transport.

#### Введение

В различных системах реагирования как международных, так и российских, предусматривается оценка рисков возникновения транспортных происшествий [1,2,3]. Исследованиям оценки экологических последствий транспортных происшествий (ТП) в области водного транспорта посвящены работы зарубежных ученых: Allen, 1988; Reed, 1989; Dixon, 1991; Yarlinton, 1992; Tanden, 1993; Zatsapa, Ivchenko, & Ovsienko, 1993; Koike & Kako, 1996; Forsman, 1997; Bayoumi & Ghalwash, 1999; Reineke, 1999; Etkin, French-McCay, Whittier, Subbayya, & Jennings, 2002; Delgado, Kumzerova, Martynov, Mirny, & Shepelev, 2005; Reed, Emilsen, Hetland, Johansen, Buffington, & Hoverstad, 2006; Macduff, 1974; Pedersen, 1995; Fowler & Sørsgard, 2000; Tuovinen, 2005 [3,4,5].

В связи отсутствием комплексных исследований в области построения математических моделей оценки экологического риска ТП в речных условиях на объектах внутреннего водного транспорта авторами была предложена методика оценки экологических рисков транспортных происшествий и математическую модель оценки экологического риска ТП [6,7].

Цель представленного исследования: апробирование предложенной ранее математической модели [7].

Для реализации указанной цели нами были поставлены следующие задачи:

- актуализация базы данных по ТП на водных объектах на период до 2018 года;
- анализ обновленных статистических данных по ТП;
- определение участков концентрации ТП;
- оценка рисков ТП.

#### 1. Анализ обновленных статистических данных и определение участков концентрации транспортных происшествий

На рис. 1-3 приведены результаты анализа базы данных по ТП в республике Татарстан за период с 2005 по 2018 годы.

Из рис. 1 видно, что на анализируемых реках Волге и Каме количество происшествий распределилось приблизительно поровну с небольшим преобладанием происшествий на реке Волга (зафиксировано увеличение доли ТП по сравнению с предыдущим периодом наблюдения на 2,8%).

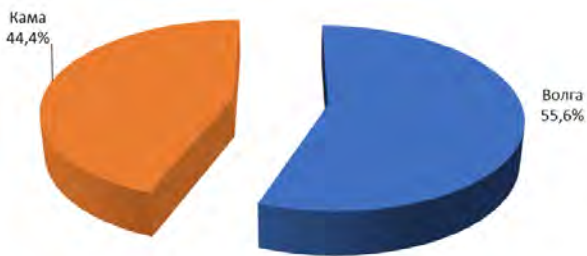


Рис. 1. Структура ТП по водным объектам

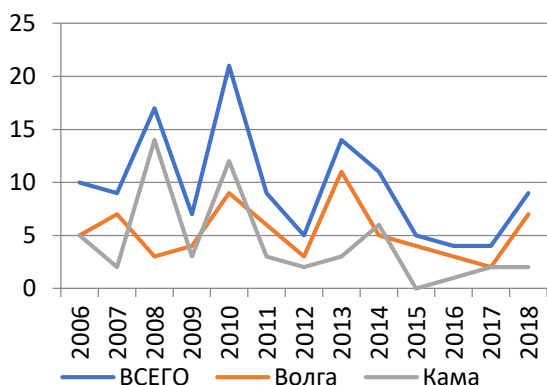


Рис. 2. Динамика ТП по водным объектам

Анализ динамики числа происшествий (рис.2), показал:

- приблизительно совпадающие тенденции по количеству происшествий на рассматриваемых реках;
- наличие скачков в количестве происшествий с периодичностью раз в 3-4 года;
- тенденцию роста количества происшествий на реке Волга при одновременном снижении аварийности на реке Кама.
- в 2017 году наблюдалось равное количество ТП на исследуемых водных объектах.

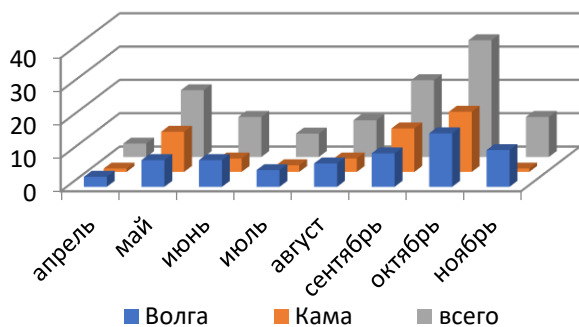


Рис. 3. Динамика происшествий по месяцам

Как видно из рис.3, основная масса происшествий приходится на май, сентябрь и октябрь. Данные «пики» количества происшествий можно увидеть как на Волге, так и на реке Каме (рис.3), следует отметить увеличение количества ТП в осенние месяцы по сравнению с предыдущим периодом наблюдения.

Анализ структуры происшествий (рис.4) позволяет заключить, что больше половины из них (62%) приходится на посадку на мель. Приблизительно 15% - приходится на различные

столкновения, 4% - на пожары. Затопления на речном транспорте незначительную долю (лишь 2% связаны с затоплением судна). Таким образом, зафиксировано снижение на 2% количества менее опасных ТП (посадка на мель) и увеличение на треть высоко опасных ТП (пожары и затопление).



Рис. 4. Структура транспортных происшествий

Анализ структуры происшествий по виду флота (рис.5) позволяет отметить, что основная часть ТП (54,3%) приходится на несамоходный флот и буксиры. Чуть менее четверти происшествий приходится на самоходные сухогрузы. Оставшаяся четверть происшествий приходится на все оставшиеся виды флота. Наблюдается тенденция увеличения доли ТП с участием танкеров (3,7% - до 2015 года, 4,3% - до 2018 года), а также снижение доли ТП с участием барж и буксиров (54,6% - до 2015 года, 54,3% - до 2018 года), сухогрузных самоходных судов (25% - до 2015 года, 23,2 - до 2018 года), пассажирских судов (6,5% - до 2015 года, 5,8% - до 2018 года), технического флота (4,6% - до 2015 года, 3,6% - до 2018 года). Следует отметить резкое увеличение доли ТП с участием маломерного флота (2,8% - до 2015 года, 4,3% - до 2018 года).

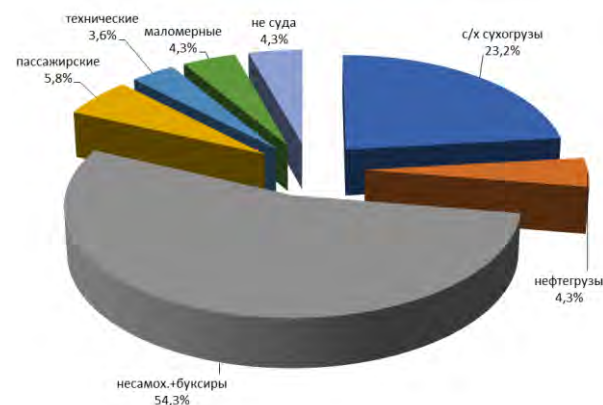


Рис. 5. Структура ТП по виду флота

Для определения участков концентрации ТП в границах республики Татарстан применялась методика [5], включающая три этапа.

На первом этапе оценивалась плотность аварийности на речных, озерно-речных и озерных участках водного пути рек Волги и Камы. На втором этапе путем применения метода пятичленной скользящей средней полученные данные по плотности аварийности усреднялись с целью

определения границ участков повышенной концентрации ТП. На третьем этапе проводилась проверка гипотезы о нормальности эмпирического распределения количества ТП на участках концентрации.

В результате выполненных исследований выявлено существование шести участков концентрации ТП на реке Волге (1277-1288 км, 1303-1325 км, 1353-1365 км, 1378-1382 км, 1388-1393 км, 1406-1415 км) и пяти аварийных участков на реке Каме (1403-1408 км, 1413-1415 км, 1422-1427 км, 1449-1460 км, 1476-1481 км).

## 2. Методика оценки экологических рисков

Методика оценки экологических рисков (рис. 6) и математическая модель риска возникновения ТП была приведена авторами ранее в [7].

## 3. Результаты расчета оценки частоты транспортных происшествий

На основании статистических данных по ТП на водных объектах в пределах республики Татарстан за 2006-2018 годы авторами были получены значения частоты происшествий по участкам концентрации ТП (табл. 1,2).



Рис. 6. Методика оценки экологических рисков транспортных происшествий [7].

Таблица 1

Результаты расчета частоты транспортных происшествий по участкам концентрации на реке Волга

Показатель	Участки концентрации ТП, км водного пути							Итого на Волге
	1277-1288	1303-1325	1353-1365	1378-1382	1388-1393	1406-1415	Вне участков	
Частота ТП на j-ом укрупненном участке, год <sup>-1</sup>	0,615385	2,307692	0,307692	0,384615	0,307692	0,230769	1,3076923	5,461538
Частота (условная) ТП с участием k-ого вида флота								
самоходные сухогрузные	0,25	0,266667	0,25	0,2	0,75	0,666667	0,2352941	0,295775
нефтеналивные	0	0	0	0,2	0	0	0,0588235	0,028169
несамоходные + буксиры	0,5	0,466667	0,5	0,8	0,25	0	0,5882353	0,492958
пассажирские	0	0,1	0	0	0	0,333333	0,0588235	0,070423
технический флот	0,125	0,066667	0,25	0	0	0	0,0588235	0,070423
маломерный флот	0,125	0,033333	0	0	0	0	0,1176471	0,056338
прочие	0	0,066667	0	0	0	0	0,1176471	0,056338

Таблица 2

Результаты расчета частот транспортных происшествий по участкам концентрации на реке Кама

Показатель	Участки концентрации ТП, км водного пути					Вне участков	Итого на Каме
	1403-1408	1413-1415	1422-1427	1449-1460	1476-1481		
Частота ТП на j-ом укрупненном участке	0,769231	0,307692	0,384615	1,076923	0,538462	1,0769231	4,153846
Частота (условная) ТП с участием k-ого вида флота							
самоходные сухогрузные	0,2	0,25	0	0,357143	0,142857	0,0714286	0,185185
нефтеналивные	0,1	0,25	0	0,071429	0	0,0714286	0,074074
несамоходные + буксиры	0,6	0,5	1	0,5	0,714286	0,8571429	0,685185
пассажирские	0,1	0	0	0	0,142857	0	0,037037
технический флот	0	0	0	0	0	0	0
маломерный флот	0	0	0	0,071429	0	0,0714286	0,037037
прочие	0	0	0	0	0	0	0

Из представленных данных следует, что среднее выборочное значение частоты ТП составляет 0,657343 год<sup>-1</sup>, что позволяет предложить следующую классификацию участков концентрации ТП в Республике Татарстан по степени опасности:

Первый класс (чрезвычайно опасные) - участки, для которых значение частоты ТП превышает среднее выборочное значение по субъекту Российской Федерации (на примере республики Татарстан) более чем на 50% (0,986 год<sup>-1</sup>): 1303-1325 км реки Волга; 1449-1460 км реки Кама.

Второй класс (особо опасные) - участки, для которых значение частоты ТП находится в диапазоне от среднего выборочного значения плюс 50% от него: 1403-1408 км реки Кама.

Третий класс (высоко опасные) - участки, для которых значение частоты ТП находится в диапазоне от среднего выборочного значения минус 50% от него: 1277-1288; 1378-1382 км реки Волга; 1422-1427; 1476-1481 км реки Кама.

Четвертый класс (умеренно опасные) - участки, для которых значение частоты ТП меньше среднего выборочного значения более чем на 50% (меньше 0,329 год<sup>-1</sup>): 1353-1365; 1388-1393; 1406-1415 км реки Волга; 1413-1415 км реки Кама.

На рис. 7,8 показаны два наиболее опасных участка концентрации ТП.

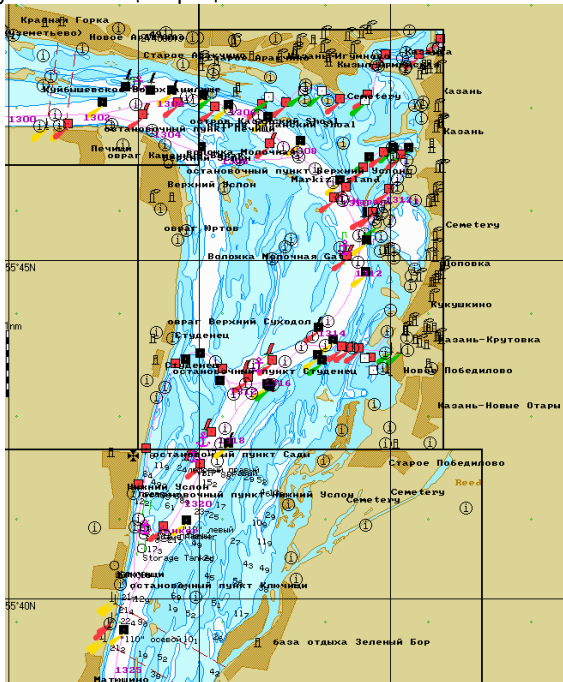


Рис. 7. Участок концентрации транспортных происшествий. Река Волга 1303-1325 км

Из картографической схем приведенных участков видно, что их аварийность может быть связана с извилистостью судового хода, наличием островов и мелей, и отягощена интенсивностью эксплуатации (судоходством и местами проведения грузовых операций).

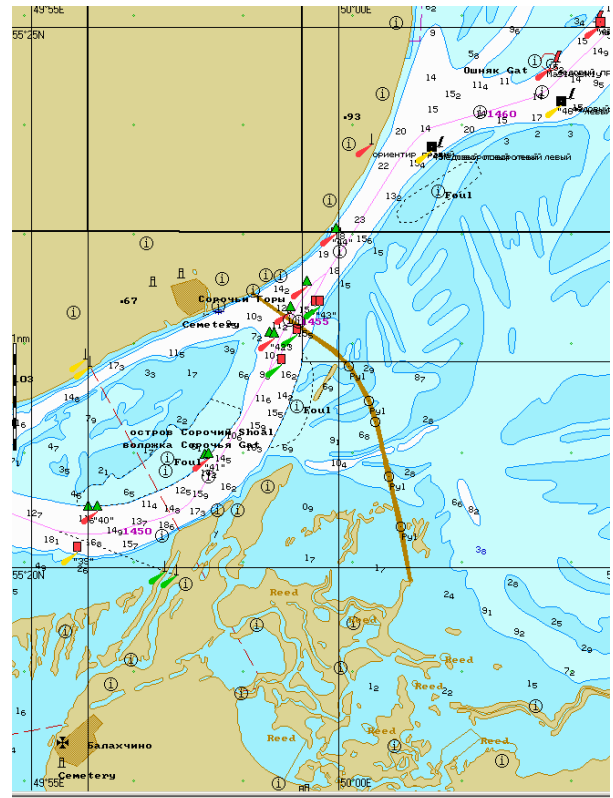


Рис. 8. Участок концентрации транспортных происшествий. Река Кама 1449-1460 км

### Заключение

Таким образом, в данной работе был обновлен анализ статистических данных по ТП, определены участки концентрации ТП и по предложенной ранее авторами математической модели оценены риски ТП на водных объектах республики Татарстан.

В результате анализа статистических данных по ТП установлено:

- существует тенденция роста количества происшествий на реке Волга при одновременном снижении аварийности на реке Кама; на реке Волге зафиксировано увеличение доли ТП по сравнению с предыдущим периодом наблюдения на 2,8%;
- увеличение количества ТП в осенние месяцы по сравнению с предыдущим периодом наблюдения (до 2015 года);
- снижение на 2% количества менее опасных ТП (посадка на мель) и увеличение на треть высоко опасных ТП (пожары и затопление)
- тенденция увеличения доли ТП с участием танкеров, а также снижение доли ТП с участием барж и буксиров, сухогрузных самоходных судов, пассажирских судов, технического флота, Следует отметить резкое увеличение доли ТП с участием маломерного флота (2,8% - до 2015 года, 4,3% - до 2018 года).

Основным результатом исследований является разработанная классификация участков концентрации ТП в республике Татарстан по степени опасности в зависимости от уровня частоты возникновения ТП.

Своими дальнейшими задачами мы видим:

- дальнейшее апробирование предложенной ранее модели с учетом расчетов убытков от транспортных происшествий;

- картографирование рисков;
- оценка экологических рисков на внутренних водных путях России;
- разработку организационных и технических мероприятий по снижению уровня экологического риска.

#### Литература

1. Алешин И.В., Гончаров В.К., Зуева Е.С., Портной А.С. Безопасность морских технологий: обеспечение экологической безопасности морских технологий. Морские интеллектуальные технологии. 2017. Т. 1. № 2 (36). С. 11-16.
2. Корнев А.Б., Домнина О.Л., Пластинин А.Е. Пути развития экологической безопасности региона. В сборнике: Великие реки'2016 Труды научного конгресса 18-го Международного научно-промышленного форума: в 3-х томах. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет; ответственный редактор А. А. Лапшин. 2016. С. 90-92.
3. Дмитриев В.Г. Оценка экологического риска. Аналитический обзор публикаций. Арктика и Север. 2014. № 14. С. 126-147.
4. Пластинин А. Е. Идентификация событий при разливах нефти с судов. Речной транспорт (XXI век). 2016. №1(77). С.52-56.
5. Наумов В.С., Пластинин А.Е. Определение вероятных районов разливов нефти в Цимлянском водохранилище. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2017. № 53. С. 75-81.
6. Пластинин А.Е., Домнина О.Л. Оценка экологического риска транспортных происшествий на водных объектах в республике Татарстан. В сборнике: ВЕЛИКИЕ РЕКИ' 2017 труды научного конгресса 19-го Международного научно-промышленного форума: в 3 томах. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. 2017. С. 322-325.
7. Домнина О.Л., Захаров В.Н., Отделкин Н.С., Пластинин А.Е. Оценка экологического риска транспортных происшествий на водных объектах. Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 2-4 (42). С. 79-86

#### References

1. Aleshin I.V., Goncharov V.K., Zueva E.S., Portnoy A.S. Bezopasnost' morskikh tekhnologiy: obespechenie ekologicheskoy bezopasnosti morskikh tekhnologiy. Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2017. T. 1. № 2 (36). p. 11-16.
2. Kornev A.B., Domnina O.L., Plastinin A.E. Puti razvitiya ekologicheskoy bezopasnosti regiona. V sbornike: Velikie reki'2016 Trudy nauchnogo kongressa 18-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma: v 3-kh tomakh. Nizhegorodskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet; otvetstvennyy redaktor A. A. Lapshin. 2016. p. 90-92.
3. Dmitriev V.G. Otsenka ekologicheskogo riska. Analiticheskiy obzor publikatsiy. Arktika i Sever. 2014. № 14. p. 126-147.
4. Plastinin A. E. Identifikatsiya sobytiy pri razlivakh nefi s sudov. Rechnoy transport (XXI vek). 2016. №1(77). p.52-56.
5. Naumov V.S., Plastinin A.E. Determination of probable areas of oil spills in tsimlyansk reservoir. Bulletin of the Volga state University of water transport. 2017. № 53. p. 75-81.
6. Plastinin A.E., Domnina O.L. Otsenka ekologicheskogo riska transportnykh proissheshtviy na vodnykh ob"ektakh v respublike Tatarstan. V sbornike: VELIKIE REKI' 2017 trudy nauchnogo kongressa 19-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma: v 3 tomakh. Nizhegorodskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet. 2017. p. 322-325.
7. Domnina O. L., Zakharov V. N., Otdelkin N. S., Plastinin A. E. Assessment of environmental risk of traffic accidents on water bodies. Marine intellectual technologies. 2018. Volume 2 Issue 4. p. 79-86

УДК 504.06

## ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ПРИ АВАРИЙНЫХ РАЗЛИВАХ НЕФТИ НА ОБЪЕКТАХ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

**Валерий Иванович Решняк**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химии и экологии  
Санкт-Петербургский государственный университет морского и речного флота имени адмирала  
С.О. Макарова  
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: RV53@mail.ru

**Василий Николаевич Захаров**

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: nauka@vgavt-nn.ru

**Дмитрий Сергеевич Мизгирев**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

**Анатолий Сидорович Слюсарев**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

### Аннотация

В работе представлена методика оценки уровня экологической опасности техногенных объектов при аварийном разливе нефти или нефтепродуктов. При этом уровень экологической опасности предложено характеризовать с помощью параметра риск, который определяется как произведение вероятности аварийного разлива на ущерб. Предложено оценку возможного риска выполнять для отдельных групп технических устройств, обеспечивающих перемещение нефти в границах исследуемого объекта, например, нефтепорта. Предложен принцип формирования групп технических устройств. Для отдельных групп технических устройств рассчитываются значения возможных рисков, определяя предварительно возможные ущербы и его вероятность. Последнее позволяет устанавливать наиболее опасные группы технических средств. С целью разработки эффективных защитных мер предложено для отдельных групп технических устройств, характеризующихся наибольшим риском аварийного загрязнения, формировать цепь событий, связанных причинно-следственными связями и в этой цепи находить место реализации защитных мер. В целом такой подход позволяет целенаправленно применять комплекс защитных мер, направленных на снижение риска аварийного разлива нефти.

**Ключевые слова:** аварийное загрязнение, разлив нефти, риск, вероятность, ущерб, защитные меры.

## THE ECOLOGICAL RISK ASSESSMENT DURING ACCIDENTAL OIL SPILLS AT WATER TRANSPORT OBJECTS

**Valery I. Reshnyak**

the professor, Dr.Sci.Tech.,  
the head of the Department of the chemical and ecology,  
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
Dvinskajya, 5/7, St. Petersburg 199035, Russian Federation  
e-mail: RV53@mail.ru

**Vasily N. Zakharov**

the professor, Dr.Sci.Tech.  
the chief Researcher  
Volga State University of Water Transport,  
Nesterova St., 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation  
e-mail: nauka@vgavt-nn.ru

**Dmitriy S. Mizgiriyov**

the assoc. professor, Dr.Sci.Tech.  
the professor of lifting and transport machines and machine repair Department  
Volga State University of Water Transport  
Nesterova, 5, Nizhny Novgorod 603951, Russian Federation  
e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

**Anatoliy.S. Slyusarev**

the assoc. professor, Dr.Sci.Tech.

the professor of lifting and transport machines and machine repair Department

Volga Sate University of Water Transport

Nesterova, 5, Nizhny Novgorod 603951, Russian Federation

e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

### Abstract

The paper presents a methodology for assessing the level of environmental hazard of industrial objects during an accidental oil or oil product spill. At the same time, it is proposed to characterize the level of environmental hazard using the risk parameter, which is defined as the product of the probability of an accidental spill and damage. It is proposed to assess the possible risk for certain groups of technical devices that ensure the movement of oil within the boundaries of the studied object, for example, an oil port. The principle of forming technical devices groups is proposed. For certain groups of technical devices, the values of possible risks are calculated, determining in advance the possible damage and its probability. The latter allows to set the most dangerous groups of technical means. In order to develop effective protective measures, it has been proposed for certain groups of technical devices, which have the highest risk of accidental pollution, to form a chain of causality and in this chain to find a place for the implementation of protective measures. In general, this approach allows the targeted use the set of protective measures aimed at reducing the risk of an accidental oil spill.

**Key words:** accidental pollution, oil spill, risk, probability, damage, protective measures.

### Введение

Анализ проблемы загрязнения окружающей среды техногенными объектами показывает, что, загрязнение необходимо рассматривать как эксплуатационное и аварийное [1,2]. Такой подход определяется тем, что данные виды загрязнения имеют разную природу, причины, а также способы их предотвращения. Наиболее распространенными случаями актуальным случаем аварийного загрязнения на водном транспорте являются аварийные разливы нефти в процессе ее перемещения с помощью объектов внутреннего водного транспорта – перегрузочных комплексов, объектов для временного хранения нефти, а также судов [3,4,5].

Защита окружающей среды при аварийных разливах нефти и нефтепродуктов продолжает оставаться актуальной проблемой, не смотря на определенный опыт, накопленный в данной области [6,7,8]. В основном этот опыт относится к ликвидации аварийных разливов – мерам активной защиты. К настоящему времени уже создан и представлен на рынке широкий спектр устройств для локализации пятна разлива, а также для его ликвидации с водной поверхности. Однако предотвращение загрязнения окружающей среды при аварийных разливах нефти на стадии их ликвидации часто оказывается по вполне объективным причинам малоэффективно.

В то же время известно [2], что предотвращение аварийного загрязнения окружающей среды, в том числе, и при разливах нефти, должно включать в себя также комплекс мер, направленных на предотвращение возникновения разливов нефти.

Уровень экологической опасности техногенных объектов, обеспечивающих перемещение нефти целесообразно характеризовать с помощью параметра риска. Для аналогичных целей риск как некоторый параметр, характеризующий случайные события, используется в разных областях деятельности людей [9,10,11,12,13]. Однако, при этом отсутствует однозначное понимание указанного параметра. В некоторых случаях под риском понимается вероятность нежелательных

событий – отказов оборудования, пожаров, экологических аварий. В других случаях риск характеризует и вероятность, и величину ущерба [9,10,11], который может возникать в таких случаях. Последнее дает возможность более объективно характеризовать упомянутые ситуации, в том числе, и аварийное загрязнение окружающей среды, например, при разливах нефти.

Оценка возможных рисков аварийного разлива нефти должна быть подчинена определенной последовательности. разработке которой и посвящена настоящая работа.

### 1. Теоретические основы разработки методики оценки возможных рисков аварийного разлива нефти

Авторы настоящей работы, продолжая исследования в области защиты окружающей среды от загрязнения объектами водного транспорта, исходили из следующих отправных утверждений. Прежде всего, предлагается загрязнение окружающей среды рассматривать как загрязнение эксплуатационное и аварийное. Такой подход определяется разной природой и причинами этих видов загрязнения, а также разными стратегиями защиты окружающей среды. Обоснование такого подхода изложено в ряде работ в области обеспечения экологической безопасности объектов водного транспорта [1,2].

В работе [2] сформированы основные направления защиты окружающей среды при таком виде аварийного загрязнения, как разливы нефти и нефтепродуктов - предотвращение возникновения аварийного разлива (превентивная защита), его ликвидация (активная защита), а также ликвидация последствий. При этом, по мнению автора наиболее актуальным является предупреждение возникновения аварийного разлива. Еще одним отправным положением данной работы является целесообразность характеристики аварийного загрязнения с помощью параметра риска. При этом риск как некоторый параметр необходимо определять как произведение вероятности события аварийного загрязнения и величины ущерба,

который при этом наносится окружающей среде [9,11]. Это позволяет учитывать такие основные характеристики аварийного загрязнения, как его вероятность и ущерб, который при этом может быть нанесен окружающей среде. Такой подход определяется основным отличием аварийного загрязнения от эксплуатационного – его неопределенностью пространственно-временной, а также неопределенностью с точки зрения возможного ущерба и причин. Исследуемый техногенный объект, например, порт, специализирующийся на перегрузке нефтяных

грузов должен быть представлен как совокупность отдельных технических устройств. При этом необходимо все используемые для перемещения нефти устройства разделить на несколько групп, прежде всего, по типу конструкции.

Например, трубопроводы отнести к одной группе – трубы, к другой – резервуары и так далее (рис.1). Учитывая, что технические устройства одного типа могут эксплуатироваться в разных условиях, каждая их группа может быть разделена на подгруппы, которые будут характеризоваться разными условиями эксплуатации.

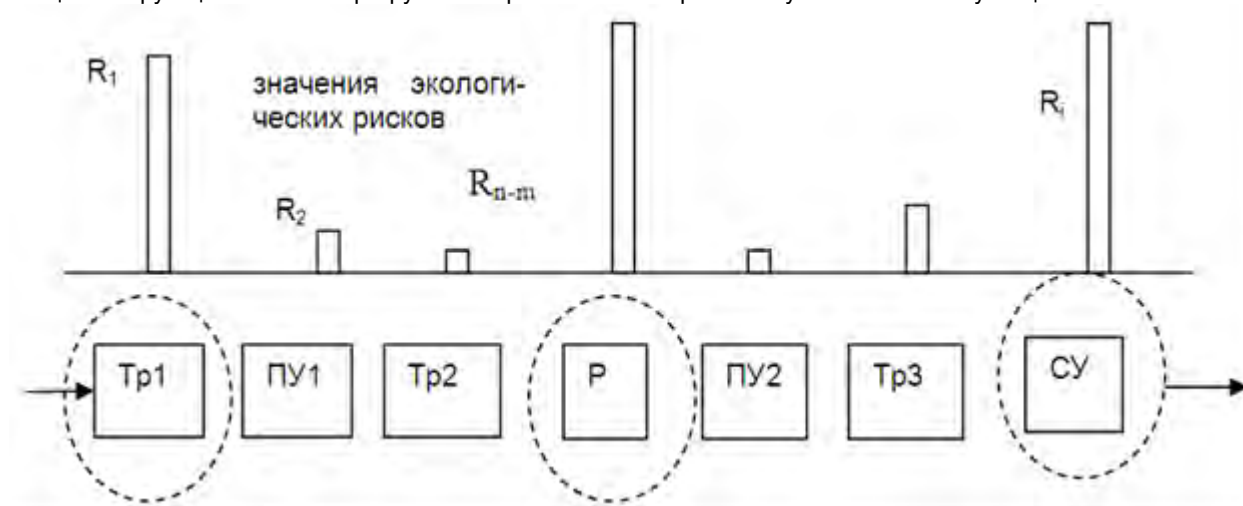


Рис. 1. Схема исследуемого объекта (типы технических устройств: Тр - труба; ПУ – перекачивающее устройство; Р – резервуар; СУ – соединение). примечание: стрелками указано направление движения нефти в границах исследуемого объекта, (9)

Одним из основных факторов, обеспечивающих эффективность превентивных защитных мер является целенаправленность их применения. Защитные меры должны быть направлены на источники аварийного разлива, которыми являются технические устройства, обеспечивающие перемещение нефти в границах исследуемого объекта.

К таким устройствам относятся трубопроводы (разного назначения), резервуары, перекачивающие насосы и соединения. Такие устройства имеют разную конструкцию и назначение, а также разные условия эксплуатации, и поэтому характеризуются разным уровнем опасности аварийного разлива нефти. Понятно, что защитные меры должны быть направлены на наиболее потенциально опасные технические устройства, откуда и возникает необходимость оценки этой опасности.

Для каждой из установленных групп технических устройств определяется значения рисков с целью определения наиболее опасных групп технических устройств. На рис.1 такие группы выделены пунктирной линией. Анализ структуры риска показывает, какая составляющая величины риска является определяющей. Такой подход учитывает разный характер защитных мер в зависимости от задач, на решение которых эти

меры ориентированы – снижение вероятности или возможного ущерба.

## 2. Алгоритм исследования экологических рисков потенциально опасных объектов

Исследование экологических рисков аварийного загрязнения окружающей среды потенциально опасных объектов выполняется с целью получения информации о максимально возможных рисках, их источниках и причинах возникновения. На основании такой информации формируется комплекс защитных мер – организационных мероприятий и технических средств, и планы (стратегический и оперативный) их реализации. Учитывая, что источниками возможных экологических рисков на потенциально опасном стационарном объекте, являются технические устройства, то первым шагом в общей последовательности действий по исследованию рисков аварийного загрязнения является формирование различных групп технических устройств, которые обеспечивают перемещение нефти от ее поступления на исследуемый объект до ее отгрузки (рис. 2). Такие группы формируются в два этапа. На первом этапе формирование осуществляется по конструктивным признакам, например, трубы включаются в одну группу, а емкости для временного хранения нефти образуют свою группу.





Рис. 2. Алгоритм исследования экологических рисков и формирования комплекса превентивных защитных мер

На втором этапе рассматриваются условия эксплуатации устройств, входящих в каждую группу и при наличии отличий в условиях эксплуатации устройства, входящие в состав одной группы разносятся в разные подгруппы. Устройства одного конструктивного типа, например, трубы, могут работать в разных условиях, что может повлиять на риски аварийного загрязнения. Например, разное количество нефти, перекачиваемой по трубам в зависимости от характера использования трубопроводов (не регулярные перекачки или постоянные) и их пропускной способности могут характеризоваться разными значениями максимально возможных потерь (ущерба) в случае разрыва трубы. Поэтому при формировании групп технических устройств необходимо учитывать не только особенности конструкции, но и условия их эксплуатации. Типизация технических устройств, обеспечивающих перемещение нефти целесообразна еще по одной причине. Такой подход позволяет разрабатывать и использовать типовые защитные меры.

На следующем шаге анализа возможных рисков для каждой группы (подгруппы) технических средств определяются величины возможных вероятностей и ущерба, что позволяет рассчитать возможные риски. Одним из методов выполнения такой оценки является метод экспертных оценок. По результатам расчета возможных рисков

устанавливаются наиболее опасные группы технических устройств.

Формирование предложений по защитным мерам выполняется по результатам следующего действия – установление причин возможных аварийных ситуаций. Установление причин предполагает выстраивание цепи событий, связанных причинно-следственными связями и приводящими к возникновению аварийной ситуации. Далее выполняется анализ указанных событий с целью определения события в этой цепи, относительно которого могут быть предложены эффективные меры, обеспечивающие предотвращение возникновения аварийного загрязнения окружающей среды. Всякому событию, в том числе и возникновению аварийного разлива нефти, предшествуют события, которые связаны причинно-следственными связями.

Каждое событие в такой цепи является следствием некоторого события (событий), произошедших по времени ранее, и причиной для события, которое произошло позже. Разрыв этой цепи путем гарантированного предотвращения посредством различных мер любого события этой цепи, обеспечивает предотвращение возникновения аварийной ситуации. Выбор такого события связан с такими факторами, как возможность реализации указанных мер (защитных) и финансовыми затратами.

### Выводы

Таким образом, авторами настоящей работы предложена последовательность действий при исследовании рисков аварийного разлива нефти при эксплуатации объектов водного транспорта, применяемых для перемещения нефти или нефтепродуктов – перегрузки, хранения и перевозки. В основу исследования экологических рисков таких объектов положен ряд определенных теоретических предпосылок. Предложено анализ рисков выполнять для отдельных групп технических устройств,

являющихся потенциальными источниками аварийных разливов нефти, с целью определения наиболее опасных. Исследование рисков, их структуры, а также анализ событий, предшествующих возникновению аварийной ситуации, позволяют установить наиболее опасные группы технических устройств, а также характер и меру их опасности. В свою очередь это позволяет сформировать комплекс целенаправленных и эффективных защитных мер, которые обеспечат защиту окружающей среды от возможного аварийного разлива нефти посредством предотвращения его возникновения.

### Литература

1. Решняк В.И. Предотвращение загрязнения водоемов нефтесодержащей подсланевой водой при эксплуатации судов и судовых энергетических установок: моногр. СПб.: ГУМРФ им. адм.С.О.Макарова, 2011. 207 с.
2. Решняк В.И. Система управления экологической безопасностью судов на внутренних водных путях: моногр. СПб.: ГУМРФ им. адм.С.О.Макарова, 2017. 207 с.
3. Наумов В.С., Пластинин А.Е. Определение вероятных районов разливов нефти в Цимлянском водохранилище. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2017. № 53. С. 75-81.
4. Пластинин А. Е. Оценка ожидаемого ущерба водным объектам при разливах нефти. Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2013. № 1 (20). С. 97-104.
5. Этин В.Л., Чебан Е.Ю., Иванов В.М., Васькин С.В., Лукина Е.А., Сосенков Ф.С. Организация борьбы с разливами нефти на внутренних водных путях: моногр. Н.Новгород: ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2015. 284 с.
6. Альхименко А. И. Аварийные разливы нефти в море и борьба с ними: моногр. СПб.: ОМПРЕСС, 2005. 237 с.
7. Курников А. С. Концепция повышения экологической безопасности судна: моногр. Н. Новгород: Изд-во ВГАВТ, 2002. 80 с.
8. Решняк В.И. Опыт организации и использования технических средств для ликвидации аварийных разливов нефти. Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2018. №2(48). С. 287-299.
9. Туркин В.А., Чура Н.Н. Экологическая безопасность и ее мера - риск: аспекты теории и практики. Безопасность в техносфере. 2007. № 2. С. 11-16.
10. Домнина О.Л., Захаров В.Н., Отделкин Н.С., Пластинин А.Е. Оценка экологического риска транспортных происшествий на водных объектах. Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4(42). Т.2. С. 79-86.
11. Тихомиров Н.П. Методы анализа и управления эколого-экономическими рисками: моногр. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 350 с.
12. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности, приказ МЧС от 30.06.2009 г. № 382 "Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности" (с изменениями и дополнениями). Система ГАРАНТ: <http://base.garant.ru/12169057/#ixzz5aQsl2wYC>.
13. Kozar Ł. Zarządzanie ryzykiem środowiskowym w przedsiębiorstwie jako kierunek wspierania budowy zielonej gospodarki, Research Papers of the Wrocław University of Economics / Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu. 2017, Issue 470, p .62-74.

### References

1. Reshnjak V.I. Predotvrashhenie zagrjaznenija vodoemov neftesoderzhashhej podslanevoj vodoj pri jekspluatácii sudov i sudovyh jenergeticheskijh ustanovok: monogr. SPb.: GUMRF im. adm.S.O.Makarova, 2011. 207 s.
2. Reshnjak V.I. Sistema upravlenija jekologicheskoj bezopasnost'ju sudov na vnutrennih vodnyh putjah: monogr. SPb.: GUMRF im. adm.S.O.Makarova, 2017. 207 s.
3. Naumov V.S., Plastinin A.E. Opredelenie verojatnyh rajonov razlivov nefiti v Cimljanskom vodohranilishhe. Vestnik Volzhskoj gosudarstvennoj akademii vodnogo transporta. 2017. № 53. S. 75-81.
4. Plastinin A. E. Ocenka ozhidaemogo ushherba vodnym ob#ektam pri razlivah nefiti. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2013. № 1 (20). S. 97-104.
5. Jetin V.L., Cheban E.Ju., Ivanov V.M., Vas'kin S.V., Lukina E.A., Sosenkov F.S. Organizacija bor'by s razlivami nefiti na vnutrennih vodnyh putjah: monogr. N.Novgorod: FGBOU VO «VGUVT», 2015. 284 s.
6. Al'himenko A. I. Avarijnye razlivy nefiti v more i bor'ba s nimi: monogr. SPb.: OMPRESS, 2005. 237 s.
7. Kurnikov A. S. Konceptija povyshenija jekologicheskoj bezopasnosti sudna: monogr. N. Novgorod: Izd-vo VГАVТ, 2002. 80 s.
8. Reshnjak V.I. Opyt organizacii i ispol'zovanija tehnicheskijh sredstv dlja likvidacii avarijnyh razlivov nefiti. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2018. №2(48). С. 287-299.
9. Turkin V.A., Chura N.N. Jekologicheskaja bezopasnost' i ee mera - risk: aspekty teorii i praktiki. Bezopasnost' v tehnosfere. 2007. № 2. S. 11-16.

10. Domnina O. L., Zakharov V. N., Otdelkin N. S., Plastinin A. E. Assessment of environmental risk of traffic accidents on water bodies. Marine intellectual technologies. 2018. Volume 2 Issue 4. p. 79-86
11. Tihomirov N.P. Metody analiza i upravlenija jekologo-jekonomicheskimi riskami: monogr. M.: JuNITI-DANA, 2003. 350 s.
12. Metodika opredelenija raschetnyh velichin pozharnogo riska v zdaniyah, sooruzhenijah i pozharnyh otsekah razlichnyh klassov funkcional'noj pozharnoj opasnosti, prikaz MChS ot 30.06.2009 g. № 382 "Ob utverzhdenii metodiki opredelenija raschetnyh velichin pozharnogo riska v zdaniyah, sooruzhenijah i stroenijah razlichnyh klassov funkcional'noj pozharnoj opasnosti" (s izmenenijami i dopolnenijami). Sistema GARANT: <http://base.garant.ru/12169057/#ixzz5aQsl2wYC>.
13. Kozar Ł. Zarządzanie ryzykiem środowiskowym w przedsiębiorstwie jako kierunek wspierania budowy zielonej gospodarki, Research Papers of the Wrocław University of Economics / Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu. 2017, Issue 470, p .62-74.

УДК 519.25, 004.93+ 621.397.13.037.372

## МЕТОД И АЛГОРИТМЫ ТРИАНГУЛЯЦИОННОГО КОДИРОВАНИЯ И ДЕКОДИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ МОРСКИХ СЮЖЕТОВ

**Шакиб Субхиевич Фахми**

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник  
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук  
профессор кафедры систем автоматизированного проектирования  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус I, помещение 11-53  
Тел.: +7(812) 234-36-75 e-mail: shakeebf@mail.ru

**Максим Максимович Железнов**

доктор технических наук, доцент  
профессор кафедры Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве  
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)  
129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26  
Тел.: +7(495)287-49-19 e-mail: ZheleznovMM@mgsu.ru

**Сергей Николаевич Турусов**

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

### Аннотация

В работе рассмотрены метод и алгоритмы кодирования и декодирования изображений морских сюжетов на основе пространственного разбиения изображений. На этапе сжатия разработаны процедуры разбиения исходного изображения на полигоны различной формы и размера и предложены три новых алгоритма нахождения опорных точек, учитывающих статистические свойства и характеристик изображений морских судов. на этапе восстановления применены две процедуры: а) построение триангуляции как по пирамидално-структурированным визуальным данным, так и по известным классическим алгоритмам триангуляции Делоне и, б) аппроксимация яркостей пикселей треугольников для получения результирующих изображений. В результате моделирования алгоритмов кодирования и декодирования изображений по опорным точкам получены графики сравнения информационных показателей качества транспортных видеосистем: точность восстановления результирующих изображений в виде отношения сигнала к шуму и коэффициента сжатия, характеризующий скорость передачи, выраженную в виде числа бит на пиксель. Получены результаты сравнения предложенных алгоритмов кодирования и декодирования на основе предложенного метода с известными методами дискретного косинусного преобразования, положенного в основу стандарта JPEG и MPEG и дискретного вейвлет преобразования, положенного в основу стандарта JPEG 2000.

**Ключевые слова:** Изображения морских сюжетов, косинусное преобразование, вейвлет, триангуляция, сжатия и восстановление.

## THE MARINE IMAGES CODING AND DECODING METHOD AND ALGORITHMS

**Shakeeb S. Fahmi**

Dr.Tech.Sc, docent, Leading researcher  
Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences,  
Professor of DEPARTMENT of Computer Aided Design Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"  
5, Professora Popova Street, St. Petersburg, 197376, Russian Federation  
Tel.: +7(812) 234-36-75 e-mail: shakeebf@mail.ru

**Maxim M. Zheleznov**

Dr.Tech.Sc, docent  
Professor of Department of Information Systems, Technology and Automation in Construction  
MOSCOW STATE UNIVERSITY OF CIVIL ENGINEERING (NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY)  
Yaroslavskoye shosse, 26, , Moscow, 129337, Russian Federation  
Tel.: +7(495)287-49-19 e-mail: ZheleznovMM@mgsu.ru

**Sergey N. Turusov**

Doctor of technical sciences, Professor,  
General Director of JSC all-Russian scientific research design and Technology Institute of electrical engineering (VNIIT EM)  
Blagodatnaya str., 2, St. Petersburg, 196105, Russian Federation  
Tel.: 8 (812) 369-93-61e-mail: office@vnitiem.ru

### Abstract

The paper deals with the method and algorithms for encoding and decoding images of marine scenes based on the spatial splitting of the image signal. At the compression stage, two procedures for splitting the original image into polygons of different shapes and sizes were developed and three new algorithms for finding control points were proposed, taking into account the statistical properties and characteristics of images of ships. At the stage of reconstruction, two procedures were developed: a) triangulation based on both pyramidal-structured visual data and well-known classical Delaunay triangulation algorithms; and b) triangle shading to obtain the resulting images. The simulation algorithms for encoding and decoding images based on control points obtained comparison charts of information regarding the quality of transport systems: recovery accuracy of the resulting images in the form of ratio of signal to noise ratio and compression ratio characterizing the transmission speed expressed in bits per pixel. The obtained results compare the proposed algorithms for encoding and decoding based on the proposed method with the known method of discrete cosine transform, forms the basis of the JPEG standard and MPEG, the discrete wavelet transform, forms the basis of the standard JPEG 2000

**Key words:** Images of ships, cosine transformation, wavelet, triangulation, compression and restoration.

### Введение

Проектирование интеллектуальных транспортных видеосистем (ИТВС) наблюдения и с целью передачи визуальных данных без шума и помех в реальном времени, безусловно, является необходимым и востребованным для решения проблем оперативного принятия решений в задачах обеспечения безопасности морских акваторий [1]. Однако основным препятствием для передачи видеоинформации в ИТВС наблюдения является ограниченная пропускная способность канала связи [2,3]. Недостаточная ширина канала ограничивает объем передаваемой информации, тем самым возрастает актуальность сжатия визуальных данных при сохранении качества.

Современный мир не возможно представить без применения цифровых видеокамер для получения всеобщей и охватывающей информации о событиях прямо в момент его возникновения. Такая информация, в частности видеоинформация характеризуется уникальностью, динамичностью и нестационарностью, что делает её практически неподдающейся формальной структуризации [4,5]. Стремительное увеличение потока видеоданных ведет к значительным изменениям в методах обработки с целью сжатия и передачи в реальном времени и с учетом жестких ограничений в пропускной способности каналов связи [6,7].

На сегодняшний день качественная, высокопроизводительная компьютерная обработка видеоинформации является одной из важнейших проблем разработчиков техники и технологии передачи видео. Огромные средства вкладываются в разработку различных мультимедийных систем [8].

Многие разработчики вместо анализа видеоинформации занялись исследованием и разработкой параллельных алгоритмов быстрых вычислений разнообразных математических преобразований, забыв о том, что это, в первую очередь, аппарат абстрактных преобразований. При этом отсутствие семантики привело к узкому внедрению достижений теории информации в рамках только передачи абстрактного битового потока и, следовательно, ограничению в задачах представления и анализа, без которых невозможно получить формализацию понятия качества информации [9,10].

Переход в спектральную область сигнала, который имеет главный недостаток, заключающийся в преобразовании значений отсчетов изображения в абстрактные некоррелированные коэффициенты, позволяющие, всего лишь, разделить сигнал не более чем на высокочастотную и низкочастотную области [11], при этом абстрактные коэффициенты (не содержащие смысла) делают такие устройства пригодными только для осуществления единственной функции – это передача видеоинформации в реальном времени.

Появление мощных цифровых сигнальных процессоров с относительно большой емкостью оперативной памяти и современных процессорных систем на кристалле с реконфигурируемой логикой привело к развитию полигонально-рекурсивных и пространственных методов анализа и передачи видеоинформации [2], использованию принципа минимальной длины описания [2,8] в задачах семантического и синтаксического характера. Параллельно с этим стало востребованным решение более важной проблемы – это структурирование видеоданных либо для решения задачи эффективного хранения (создание видео-образ и баз видео данных) и анализа (обнаружение и распознавание), либо для выполнения быстрых параллельных преобразований с целью обеспечения оперативной доставки видеоинформации пользователю [8,12, 13].

В связи с этим возникла острая необходимость, с одной стороны, в разработке алгоритмов без перехода в спектральную область сигнала для выявления полезной информации, т.е. свойств и характеристик объектов на изображениях, а с другой, в разработке эффективных способов восстановления результирующих изображений на основе выделенной информации.

### 1. Постановка задачи исследования

Цифровые изображения состоят из пикселей, которые обозначают определенный цвет в любом изображении. Оцифровка изображения - это измерение цвета во многих точках. Пиксели организованы в виде двумерного массива (строк и столбцов), который образует двумерное изображение. Благодаря усовершенствованию технологии оцифровки, с помощью цифровых камер выполняются функции: захвата, хранения и передачи изображений. Эти цифровые камеры

мгновенно производят захват и обработка, но процесс обмена и передачи этих изображений были основным препятствием из-за огромного объема визуальных данных. Кроме того, сохранение исходных изображений для дальнейшей обработки сталкивается с такими проблемами, как размер хранилища и носителя передачи.

Для решения этих задач применяется сжатие изображения с целью уменьшения размера видеоданных и сохранения их первоначального качества. Таким образом, сжатие изображения - это технология, используемая для уменьшения количества битов - минимизации скорости передачи.

Успешное сжатие изображения фокусируется на устранении избыточности, состоящей из интерпиксельной (сформированной из корреляции между пикселями изображения), кодирующей (когда применяются менее оптимальные кодовые слова) и психовизуальной (данные, которые человеческий глаз не может визуализировать) избыточности.

Проблема сжатия изображений, которой десятилетиями занимается большое количество организаций и специалистов, имеет множество решений в связи с разнообразием часто не формализованных критериев качества, априорной информации о сигналах (статистики наблюдаемых сюжетов) и имеющихся ограничений. При этом часто остается открытым вопрос об оптимальности того или иного метода кодирования. Чаще всего используются критерии достигаемого сжатия при заданной ошибке передачи, или приближения к энтропии источника.

Существующие многочисленные методы кодирования чаще всего решают не столько проблему оптимизации сжатия, сколько проблему преодоления априорной неопределенности о статистике сигналов в совокупности с нечетко сформулированными требованиями к сложности видеосистем. Это часто переводит решение проблемы оптимизации сжатия из ранга статистического синтеза в ранг эвристического синтеза (изобретательства). Вне зависимости от типа устройств обработки видеoinформации, традиционно целью кодирования источника (эффективного кодирования или сжатия сигналов) считается экономия пропускной способности каналов связи. При этом наблюдается определенный разрыв между формализацией внешних характеристик кодера - сжатия и потери информации, и его внутренних характеристик, в первую очередь, вычислительной сложности.

Важно отметить, что представление изображений в виде структурированного набора опорных точек (ОТ) и соединение их в треугольники, в отличие от спектральных методов кодирования, имеет огромное значение с точки зрения сжатия и сохранения семантики изображений. Следовательно, в модель тракта сжатия и восстановления изображений необходимо включать следующие основные процедуры (рис. 1а):

- на этапе сжатия: а) разбиение исходного изображения на полигоны различной формы и размера (построения пирамиды изображений -

рис. 1б) и б) нахождение ОТ различными способами в зависимости от начальных условий и цели задачи сжатия;

- на этапе восстановления: а) построение триангуляции либо по пирамидально-структурированным визуальным данным либо по известным классическим алгоритмам триангуляции Делоне [15] и б) аппроксимация яркостей пикселей полигонов - треугольников для получения восстановленных изображений.

С учетом специфики и классификации изображений морских объектов, описанных в работе [2] предложенный метод должен выполнить два основных требования:

а) первое - ориентацию на решение определенного класса задач, что в данном случае является задачей сжатия изображений морских объектов, полученных из различных камер наблюдения;

б) второе - реализация системы с высокой производительностью, что достигается применением регулярных алгоритмов поиска ОТ и формирование соответствующих структур данных для представления сжатого описания ОТ.

Целью статьи является исследование и разработка метода и алгоритмов структурирования и триангуляции изображений морских сюжетов на основе рекурсивного разбиения и нахождения ОТ для передачи по последовательному каналу связи. Для достижения данной цели и выполнения вышеуказанных требований необходимо решать следующие задачи разработки:

- триангуляционного метода сжатия изображений по ОТ на основе пирамидально-рекурсивного разбиения на полигоны, что очень удобно при проектировании высокопроизводительных систем с параллельной обработкой данных;

- способа восстановления изображений морских объектов по ОТ с использованием как регулярных решёток, так и с использованием триангуляции Делоне;

- алгоритмов нахождения опорных точек с учетом корреляции и специфики морских сюжетов;

- моделирования алгоритмов и проведение сравнительного анализа результатов для оценки эффективности предложенного метода по сравнению с известными методами JPEG и вейвлет.

Структуризация видеоданных приводит к появлению крупных структурных единиц, позволяющих выявлять существенно более значимые семантические компоненты и устанавливать понятийные отношения. Разработанные программы реализации пространственно-рекурсивных алгоритмов представления и кодирования изображений по ОТ достаточно универсальны и выполняют преобразование видеoinформации, приводящее к уменьшению объема и выделению существенных, семантически значимых компонентов.

Подход, использующий пространственные алгоритмы выделения ОТ, основывается на том, что любая видеoinформация независимо от той или иной проблемно-ориентированной области содержит объект и фон [12,13],

Кроме того, найденные ОТ могут служить главным инструментом для решения задач отделения объекта от фона.

### 2. Метод кодирования и передачи изображений по опорным точкам

Суть предложенного авторами метода сжатия и восстановления изображений по ОТ заключается в полигонально-рекурсивном разбиении изображений и формировании пирамидальной структуры с минимальной длиной описания ОТ.

Пирамидальная структура представляет собой упорядоченную последовательность полигонов - треугольников с различными разрешениями и форматами, располагаемых друг над другом (рис. 1б). Изображение разбивается на полигоны одинаковой площади, затем процедура разбиения повторяется до тех пор, пока размер полигона не станет, равен одному пикселю исходного изображения.

В результате получаем полигональную решётку, далее в каждом полигоне окончательной триангуляционной решётки производится поиск ОТ, максимально характеризующие локальную область.

Следует отметить, что механизм работы человеческого глаза основан на генерации саккады в отношении оптических сигналов, представленных на константном экране. Другими словами, произвольные саккады реализуются при осмотре зрительной сцены. Основной проблемой при генерации саккад, обеспечивающих осмотр зрительной сцены, является выбор информативных ОТ на инвариантном экране. Однако какая именно точка на инвариантном экране будет в данный момент информативной, зависит от структуры зрительной сцены, количества объектов и перепадов яркости пикселей изображений.

Опорные точки, выбираемые для саккад при осмотре сцены, являются наиболее информативными. Информативность точки, в свою очередь, зависит от конкретной задачи, состава сцены и исходных гипотез.

Задача, связанная с поиском и нахождением опорных точек изображений является сложнейшей в области создания искусственного зрения [14].

На основе сказанного авторами предложены три алгоритма нахождения ОТ. Алгоритмы предполагают некоторую функцию анализа каждого полигона и позволяющая переход от одного уровня пирамиды к другому. При этом метод должен обеспечивать следующие основные характеристики пирамиды изображений:

- структурированность визуальных данных;
- взаимосвязанность ОТ всех уровней пирамиды;
- возможность представления ОТ в виде одномерного динамического списка для передачи по последовательному каналу связи.

### 3. Алгоритм кодирования и декодирования изображений

Алгоритм кодирования включает следующие основные этапы (рис. 1а):

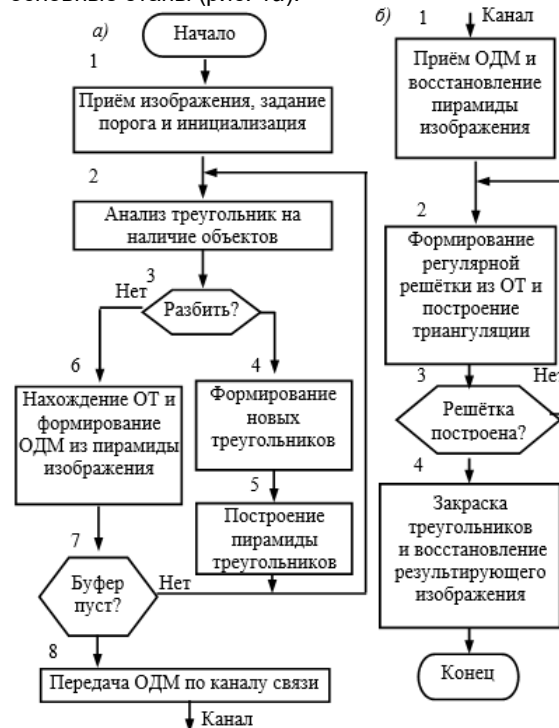


Рис. 1. Блок-схема алгоритма кодирования а) и декодирования б) путём разбиения на треугольники

1) Этап приёма исходного изображения, задание требуемого порога по яркости и инициализация переменных, определяющих значений параметров интеллектуальных транспортных видеосистем морского назначения;

2) разбиение текущего полигона и формирование первых двух треугольников и запись их в буфер заявок для анализа на наличие объектов (контуры, перепады яркости, границы и т.п.);

3) если размах по яркости в текущем полигоне больше заданного порога, то формируется новые треугольники (блок 4 рис. 1а) на соответствующем уровне пирамиды изображений (блок 5 рис.1а), иначе запускается алгоритм нахождения ОТ (блок 6 рис. 1а) и формирование одномерного динамического массива (ОДМ), представляющего пирамиду изображения;

4) энтропийное кодирование ОДМ;

5) проверка буфера на наличие заявок для анализа и переход к п.2, иначе передача ОДМ по каналу связи.

Алгоритм декодирования состоит из следующих основных этапов (рис. 2б):

1) приём ОДМ и восстановление пирамиды изображения;

2) энтропийное декодирования ОДМ;

3) построение регулярной триангуляционной решётки;

4) проверка полного построения триангуляционной решётки. Если решетка не построена, то переход к п. 2, иначе переход к п.4;

5) аппроксимация (закраска) треугольников и восстановление результирующих изображений.

Полигон может быть в одном из следующих состояний:

- полигон без объектов – это полигон, являющийся фоном и не имеющий никаких перепадов яркости и дальнейшему дроблению не подлежит;
- полигон с объектами (с ОТ) – это полигон, имеющий ОТ (перепады, контуры и. т. д.) и дальнейшему дроблению не подлежит, поскольку отклонение по яркости любых пикселей в его пределах не превышает заданное значение;
- полигон составной – это полигон, яркости пикселей которого имеют отклонение больше заданного порога и следовательно, требует дальнейшего разбиения.

#### 4. Одномерные динамические структуры данных

Под структурами данных в общем случае понимают множество элементов данных и связей между ними, в данной статье – это множество опорных точек и связь между ними, которые

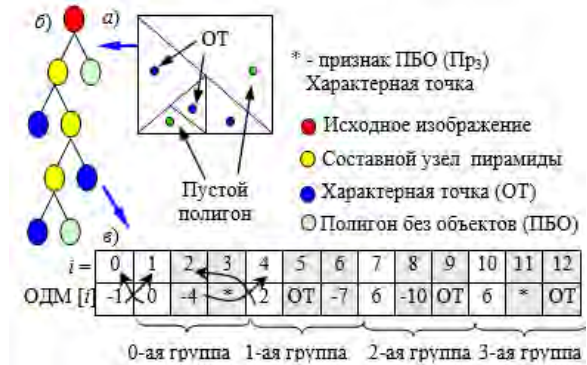


Рис. 2. Исходное изображение: а) сетка разбиения; б) пирамида; в) динамический массив связей

необходимо хранить и передавать по каналу в виде одномерных динамических массивов или списков.

Для определения роли ОТ в проведенных авторами исследованиях необходимо определить понятие опорных точек изображения.

**Определение 1** (в случае фиксированного расположения). Особые точки исходного изображения - это узлы неравномерной геометрической сетки, формируемой рекурсивным разбиением исходного изображения на непересекающиеся полигоны различной формы, в результате закраски которой получается результирующее изображение с заданной ошибкой восстановления.

В данном случае ОТ используются в качестве вершин упомянутой выше сетки и информация о них: яркости каждой вершины на исходном изображении и пространственные координаты ОТ (местоположение ОТ) – содержится в самой структуре данных пирамиды, полученной в результате деления изображения, т.е. нет необходимости дополнительно передавать информацию о координатах ОТ.

**Определение 2** (в случае произвольного расположения). Опорные точки исходного изображения - это точки исходного изображения,

максимально характеризующие свою локальную область (полигоны различной формы, полученные в результате разбиения исходного изображения). В данном случае ОТ отыскиваются в пределах каждого полигона либо сразу в процессе разбиения, либо по завершении процесса построения пирамидальной полигональной сетки для всего изображения (рис. 3). Далее определяются пространственные координаты (местоположение) в пределах полигона, при этом их значения не превышают по величине геометрические размеры соответствующего полигона, а яркости ОТ соответствуют яркостям на исходном изображении.

Такое определение охватывает все возможные подходы к структуризации данных, но в каждой конкретной задаче используются те или иные его аспекты. Для случая кодирования морских сюжетов вводятся дополнительные поля: поле для ссылок на другие уровни пирамиды и поле – указатели на составные полигоны, т.е. на полигоны требующие дальнейшего разбиения.

С позиции системного проектирования ИТВС необходимо поставить вопрос о возможности формирования единого потока данных – ОТ для передачи по последовательному каналу связи, обеспечивая при этом сохранение следующих особенностей предлагаемого метода:

- иерархичность описания процесса кодирования изображения;
- возможность постепенного восстановления при прерывании передачи;
- структура объектов изображения и связей между ними.

Проведенные исследования показали, что наиболее эффективной структуры данных для передачи множества ОТ является ОДМ (рис. 3), сгруппированных в зависимости от числа полигонов после разбиения. ОДМ, представляя собой битовый поток, то есть поток, содержащий наименьшую структурную единицу – бит (по аналогии с битовым потоком стандарта MPEG).

ОДМ состоит из групп размером в  $d + 1$ , где  $d$  – количество полигонов после разбиения ( $d = 2$  – дихотомия (рис. 4).

Каждая группа содержит следующие поля [15,16]:

- первый элемент массива всегда содержит адрес возврата для возвращения в элемент массива, откуда была взята ссылка;
  - информация о полигоне, не содержащем никаких объектов (например, фон) и данное поле содержит соответствующий признак – Пр3;
  - информация о характерной точке (или в перспективе о характерных точках) – это координаты ОТ в пределах полигона, т. е. относительно верхнего левого угла текущего полигона и яркость (или значения RGB для цветных изображений);
  - информация о том, что полигон является составным и необходимо дальнейшее разбиение. Для этого указывается номер следующего свободного элемента массива со знаком минус (-).
- Формирование ОДМ включает следующие этапы:
- разбиение исходного изображения и построение регулярной полигональной сетки;



- реализация структуры данных типа «Дерево» в зависимости от величины  $d$ ;
- формирования массива связи и сжатых визуальных видеоданных в виде ОДМ.

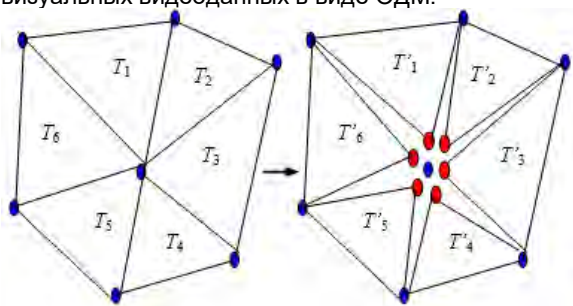


Рис. 3. Алгоритм замены смежной вершины на индивидуальные для каждого смежного треугольника

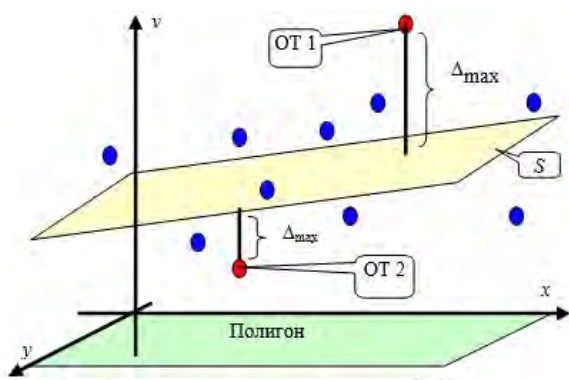


Рис. 4. Нахождение опорных точек методом МНК

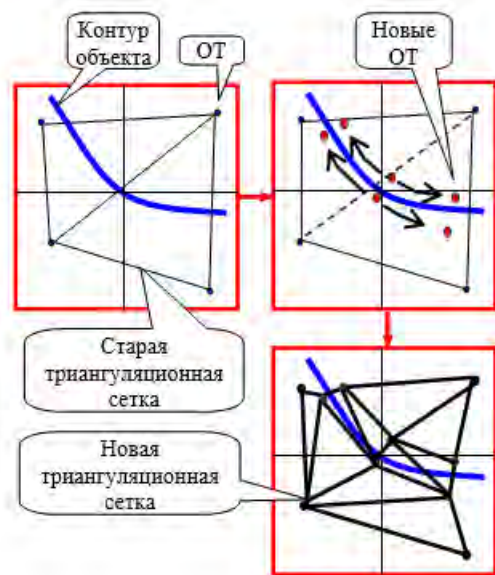


Рис. 5. Нахождение опорных точек методом восстановления границ объектов

Наличие в составе ОДМ адреса возврата позволяет двигаться по пирамиде (дереву) изображения вверх и вниз обходя все полигоны на каждом уровне и тем самым обеспечивается возможность нахождения ОТ и всех её соседей.

Данная особенность ОДМ делает возможным построение регулярной триангуляции на этапе восстановления результирующего изображений.

Поскольку ОДМ является битовым потоком, то при его составлении были соблюдены следующие правила кодирования:

- по принципу Хаффмана: часто повторяющийся признак кодируется меньшим числом битов;
- начало и конец ОДМ имеют соответствующие метки запуска и остановки.

Применение относительного способа кодирования с учетом размера и уровня полигона, позволяет сократить число битов при описании ОТ. Объекты, находящиеся вблизи начала отсчета исходного изображения (т. е. верхний левый угол полигона), имеют меньшее количество двоичных единиц и наоборот.

Двоичное дерево — это иерархическая структура данных, где каждый полигон (узел), кроме корневого, имеет два поля: первое содержит ссылку на левый потомок, а второй — на правый в ОДМ.

Основные характеристики:

- функция построения двоичного дерева рекурсивно разбивает исходное изображение на 2 прямоугольника, затем каждый прямоугольник делится на два квадрата. Функция повторяется до тех пор, пока размер полигона не станет в один пиксель. Полученное двоичное дерево — эта структура данных, используемая для представления двумерных пространственных данных (растровое изображение).

Основные характеристики:

- нумерация полигонов на каждом шаге разбиения осуществляется слева направо и сверху вниз, т. е. сначала по горизонтали, а потом по вертикали (или наоборот).

- описание структуры данных «двоичное дерево» в виде ОДМ, где элементы массива группируются в три элемента: первый элемент каждой группы имеет значение обратного адреса, т. е. адрес элемента представляющего составной полигон (родительский) и подлежащего разбиению. Остальные элементы в группе имеют разные значения в зависимости от типа полигона:

- \* — означает, что данный полигон — без объектов или перепадов, представляет однородную область изображения;

- ОТ — означает, что данный элемент содержит ссылку на встроенный список с информацией о ОТ: координаты и яркость ОТ.

### 5. Алгоритмы нахождения опорных точек

В работе приводятся три алгоритма нахождения ОТ при построении регулярных триангуляционных сеток пирамиды изображений:

#### Алгоритм № 1.

В начале строится триангуляция из 4-х угловых вершин исходного изображения. Далее оценивается среднеквадратическое отклонение (СКО) в пределах каждого треугольника для дальнейшего выполнения разбиения.

Алгоритм включает следующие основные этапы:

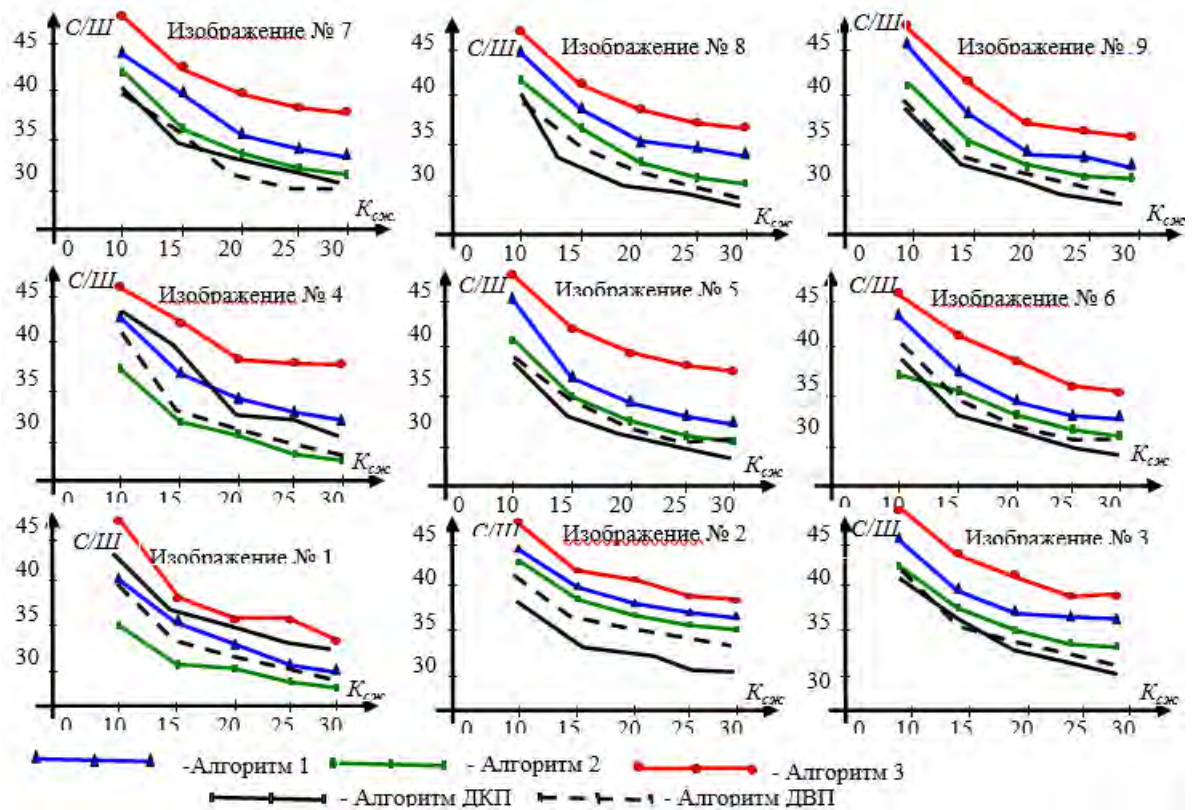


Рис. 6. Результаты моделирования спектральных и предлагаемых пространственных алгоритмов кодирования и декодирования изображений

- 1) построение триангуляции по ОТ;
- 2) восстановление результирующего изображения;
- 3) анализ точности восстановленного изображения по треугольникам – оценка СКО;
- 4) если СКО меньше заданной, то из каждой вершины формируются новые дополнительные вершины в зависимости от количества смежных треугольников (рис.5) и переход к п. 3, иначе (если СКО больше) фиксируется результат и алгоритм завершает свою работу;

**Алгоритм № 2.**

Основа данного алгоритма для нахождения ОТ состоит в применении метода наименьших квадратов (МНК) [17].

В начале формируется пирамида изображению путём разбиения на треугольники с заданной точностью. Далее по завершению процесса формирования пирамиды изображения выполняются следующие основные шаги (рис.5):

- 1) задание СКО;
- 2) для каждого полигона пирамиды вычисляется уравнение плоскости регрессии МНК (S) в пространстве (x, y, v) (рис. 4);
- 3) определяются наиболее отделённые две от плоскости S ОТ1 и ОТ2 (рис.5);
- 4) построение триангуляции с учетом новых ОТ1 и ОТ2;
- 4) производится чтение очередного полигона и переход к п. 2;
- 5) если полигон последний, то «конец», иначе переход к п. 2;
- 6) восстановление результирующего изображения.

В случае, если имеется более одной характерной точки одинаково удалённых от плоскости ( $\Delta\max$ ), то берется та точка, которая ближе к центру полигона.

**Алгоритм № 3.**

Данный алгоритм наиболее точный и требует огромные вычислительные ресурсы, так как является итерационным и основан на рекурсивном добавлении новых опорных точек до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность восстановления результирующего изображения. Однако данное преимущество в получении высокого качества достигается путём трёхкратного (и более) увеличения сложности видеосистемы в зависимости от класса изображений.

Алгоритм состоит из следующих этапов:

- 1) разбиение изображения и построения пирамиды изображения;
- 2) построения триангуляция Делоне;
- 3) перебор всех граней полученной триангуляционной сетки (рис. 6) и проверка каждой грани на наличие границ (контуров) объектов;
- 4) если имеется контур (т. е. перепад по яркости), то необходимо добавить две дополнительные (может быть и больше) новые характерные точки по обе стороны перепада (контура) с целью лучшей аппроксимации яркостей границ объектов;
- 5) построение триангуляция Делоне и восстановление результирующего изображения;
- 6) если точность восстановления удовлетворяет, то алгоритм завершается, в противном случае переход к п. 3.

Следует отметить, что во всех алгоритмах, для построения триангуляции необходимо использовать известные правила поиска и нахождения соседних ОТ для каждой вершины [15].

#### 6. Результаты моделирования и оценка информационных показатели качества ИТВС

Для решения задачи повышения эффективности ИТВС кодирования и декодирования видеoinформации на основе известных спектральных и пространственных методов необходимо исследовать информационные показатели качества: скорость передачи сжатых визуальных данных и точность восстановления результирующих изображений, заключающаяся в оценке сигнала/шуму (С/Ш) (рис. 6).

Моделирование тракта сжатия и восстановления и оценка информационных показателей качества ИТВС было выполнено над изображениями различных форматов из компактной представительной выборки морских сюжетов, опубликованной в работе [2]. Такая выборка была создана на базе разработанной классификации морских сюжетов по двум признакам: мера неопределенности и широкополосности.

Исследования процессов копирования и декодирования изображений проводились на основе следующих алгоритмов:

- предложенные авторами алгоритмы 1 – 3, описаны выше;

- дискретного косинусного преобразования (ДКП), в основу которого лежит известные стандарты сжатия изображений JPEG и видео MPEG;

- дискретного вейвлет преобразования (ДВП), в основу которого лежит известный стандарт сжатия изображений JPEG 2000.

По полученным графикам (рис. 7) можно сделать следующие основные выводы:

- 1) предложенный алгоритм № 3 дал наилучшие результаты значения сигнал/шум при различных значениях коэффициента сжатия и для всех классов изображений;

- 2) предложенный алгоритм № 2 показал хуже результаты по сравнению с вейвлетом и косинусным преобразованиями для класса

изображений с малой мерой неопределенностью и малой широкополосностью (изображение № 1);

- 3) алгоритм № 1 дал хуже результаты по сравнению с вейвлетом для класса изображений с малой широкополосностью и средней мерой неопределенности (изображение № 4).

#### Заключение

Современные исследования в области сжатия и восстановления изображений ведутся по разным направлениям: пространственные и спектральные преобразования. Каждое из этих направлений преследует цель, с одной стороны, решение задачи выделения полезной информации от шумовой, а с другой, потребность в обеспечении высокой производительности систем передачи сжатых видеоданных в реальном времени. В данной работе проведены исследования по разработке рекурсивного метода сжатия с сохранением семантики изображений и выполнен сравнительный анализ эффективности предложенного метода с известными стандартами.

По результатам исследований, приведенным в работе, можно сделать следующие выводы:

- синтез и интеллектуальных транспортных видеосистем наблюдения за морскими судами должен опираться на критерий эффективности кодера, учитывающий минимальной скорости передачи по каналу и максимального качества выделения характеристик и свойств объектов на изображениях;

- для проектирования интеллектуальных транспортных видеосистем, предназначенных для решения задач анализа и распознавания наиболее эффективным является алгоритм итерационного формирования триангуляционной решетки (алгоритм № 3);

- полученные графики позволяют определить область применения того или иного алгоритма в зависимости от цели кодирования и класса изображений;

- предложенные новые алгоритмы нахождения опорных точек на основе пространственно-рекурсивного разбиения изображения позволяют эффективно реализовать видеосистемы приёма, анализа и доставки требуемой видеoinформации с заданной точностью в реальном времени.

#### Литература

1. Малыгин И.Г., Комашинский В.И., Катцын Д.В. Некоторые проблемы построения когнитивных транспортных систем и сетей // Сборник трудов Международной научно- практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы - 2015». С.- Петербург, 24-25 ноября, 2015 г. СПб: ИПТ РАН. 2015. Т. 1. С. 3–8.
2. Фахми Ш.С. Методы, алгоритмы кодирования и классификация изображений морских судов/ М.С. Крюкова, Ш.С. Фахми, Я. Хасан и др.// Морские интеллектуальные технологии. № 1 (43). Т.3. 2019. С.145–155.
3. R. Koenen, Ed., "Overview of the MPEG-4 standard," ISO/IEC JTC/SC29/WG21, Seoul, Korea, MPEG-99-N2925, Mar. 1999.
4. Березин В.В., Фахми Ш.С., Цыцулин А.К. Начальный этап проектирования видеосистем на кристалле/ Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 11. С. 76-83.
5. Бобровский А.И., Еид М.М., Алмахрук М.М., Салем А., Фахми Ш.С. Информационные показатели качества устройств кодирования изображений по опорным точкам/ Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2016. № 3. С. 86-91. 10.
6. Фахми Ш.С. Способ кодирования и декодирования видеoinформации на основе трехмерного дискретного косинусного преобразования/ Фахми Ш.С, Цыцулин А.К. и др.// патент на изобретение RUS 2375838 19.11.2008
7. Цыцулин А.К., Фахми Ш.С., Зубакин И.А Начальный этап проектирования кодера источника непрерывного сигнала. Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2010. № 2. С. 17-34.

8. Фахми Ш.С. Точность, скорость и сложность устройств кодирования изображений по опорным точкам/ Альмахрук М.М., Бобровский А.И., Еид М.М., Соколов Ю.М., Салем А., Фахми Ш.С.// Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 4. С. 678-688.
9. Singh, M., Kumar, S., Singh, S. & Shrivastava, M. (2016). Various Image Compression Techniques: Lossy and Lossless. International Journal Of Computer Applications, 142(6), 23-26. doi: 10.5120/ijca2016909829.
10. U. S. Mohammed and W. M. Abd-elhafiez, "Image coding scheme based on object extraction and hybrid transformation technique," Int. J. of Engineering Science and Technology, vol. 2, no. 5, pp. 1375–1383, 2010.
11. Ю. С. Бехтин, Д. В. Титов. Теоретическое обоснование выбора вейвлет-базиса в задачах сжатия зашумленных сигналов. Известия ВУЗов Приборостроение 2015, Т.58, № 2.. С.87-93.
12. Шаталова Н.В., Фахми Ш.С., Мукало Ю.И., Гаврилов И.А. Обнаружение и распознавание транспортных средств. В сборнике: ТРАНСПОРТ РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ - 2016 Материалы Международной научно-практической конференции. 2016. С. 187-193. 8
13. Шагаров С.С., Зубакин И.А., Фахми Ш.С. Адаптивные алгоритмы кодирования видеоинформации. Приборы. 2010. № 4 (118). С. 28-31.
14. Риппенрейтер Ю. Б. Движения человеческого глаза. — М., 1978.— 256 с.
15. Фахми Ш.С. Полигональная рекурсивная обработка видеоинформации. Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2008. № 1. С. 42-51. 8
16. Зубакин И.А., Фахми Ш.С., Цыцулин А.К. Решения уравнения связи. Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2008. № 2. С. 9-27. 8
17. Бобровский А.И., Еид М.М., Костикова Е.В., Салем А., Алмахрук М.М., Фахми Ш.С. Выделение и хранение опорных точек изображений на основе динамических рекурсивных структур. Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2016. № 3. С. 99-107.

#### References

1. Malygin I. G., Komashinsky V. I., Kattsyn D. V. Some problems of construction of cognitive transport systems and networks // Proceedings of the International scientific-practical conference "Transport of Russia: problems and prospects - 2015". St. Petersburg, November 24-25, 2015 St. Petersburg: IPT RAS. 2015. Vol.1. P. 3-8.
2. Fahmi S. S. Techniques, coding algorithms and image classification of ships/ M. S. Kryukova, S. Fahmi, Y. Hassan et al.// Marine intelligent technologies. No. 1 (43). Vol.3. 2019. S. 145-155.
3. R. Koenen, Ed., "Overview of the MPEG-4 standard," ISO/IEC JTC/SC29/WG21, Seoul, Korea, MPEG-99-N2925, Mar. 1999.
4. Berezin, V. V., Fahmi S. S., A. K. Zazulin the Initial stage of design of systems on a chip/ Optical journal. 2012. T. 79. No. 11. S. 76-83.
5. Bobrovsky A. I., Eid, M. M., Almagro M. M., Salem A., Fahmi S. S. Information quality indicators of the device coding of images using control points/ Questions of radio electronics. A series of: Technique television. 2016. No. 3. P. 86-91. 10.
6. Fahmi S. S. Method of encoding and decoding video data based on three-dimensional discrete cosine transform/ sh. Fahmi s, Sycolin A. K. and others// patent for the invention RUS 2375838 19.11.2008
7. Sycolin A. K., Fahmi S. S., I. Zubakin And the Initial stage of designing the source coder of a continuous signal. Questions of electronics. A series of: Technique television. 2010. No. 2. P. 17-34.
8. Fahmi S. S. Precision, speed and complexity of the device coding of images using control points and/ Almagro M. M., Bobrovsky A. I., Eid, M. M., Sokolov Yu. M., Salem A., Fahmi S. S.// Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics. 2016. T. 16. No. 4. P. 678-688.
9. Singh, M., Kumar, S., Singh, S. & Shrivastava, M. (2016). Various Image Compression Techniques: Lossy and Lossless. International Journal Of Computer Applications, 142(6), 23-26. doi: 10.5120/ijca2016909829.
10. U. S. Mohammed and W. M. Abd-elhafiez, "Image coding scheme based on object extraction and hybrid transformation technique," Int. J. of Engineering Science and Technology, vol. 2, No. 5, pp. 1375-1383, 2010.
11. Y. S. Bekhtina, D. V. Titov. Theoretical justification of the choice of wavelet basis in problems of compression of noisy signals. Izvestia Universities Instrumentation 2015, Vol. 58, № 2.. P. 87-93.
12. Shatalova N. V., Fahmi sh. S., Mukalo Yu. I., Gavrilov I. A. Detection and recognition of vehicles. In the collection: TRANSPORT of RUSSIA: PROBLEMS and PROSPECTS-2016 Proceedings of the International scientific and practical conference. 2016. P. 187-193. Eight
13. Shugarov S. S. Zubakin, I. A., Fahmi S. S., Adaptive algorithms for coding of video information. Instrumentation. 2010. No. 4 (118). P. 28-31.
14. Reperatur Y. B. Movement of the human eye. — М., 1978.— 256 p.
15. Fahmi S. S. Polygon recursive processing of video information. Questions of electronics. A series of: Technique television. 2008. No. 1. S. 42-51. Eight
16. Zubakin, I. A., Fahmi S. S., A. K. Zazulin the solution of the equation of communication. Questions of electronics. A series of: Technique television. 2008. No. 2. S. 9-27. Eight
17. Bobrovsky A. I., Eid, M. M., E. V. Kostikova, G. Salem, A., Almagro M. M., Fahmi S. S. the Allocation and storage of the reference points of the image based on the dynamic recursive structures. Questions of electronics. A series of: Technique television. 2016. No. 3. S. 99-107.

УДК 519.816:004.891: 007.51

## ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ОБЪЕКТОВ В МОДЕЛИ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЖИДКОСТЬ»

**Ольга Юрьевна Лукомская**

кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник  
лаборатории интеллектуальных транспортных систем  
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук,  
199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, д.13  
доцент кафедры Корабельных систем управления  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)  
197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5  
e-mail: luol@mail.ru

**Владимир Ильич Комашинский**

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

**Александр Алексеевич Таранцев**

доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией  
проблем безопасности транспортных систем  
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук  
199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, д.13  
e-mail: info@iptran@mail.ru

**Андрей Александрович Таранцев**

преподаватель кафедры пожарной тактики и службы  
Академия Государственной противопожарной службы МЧС России  
129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4  
e-mail: dask\_cradle@mail.ru

### Аннотация

В статье исследуются движения людских потоков с целью решения различных прикладных задач. Известно, что такие потоки напоминают течение особой жидкости, получившей название «интеллектуальной», и подчиняются определённым закономерностям, скорость движения которой зависит от её плотности.

Приводятся сравнительные модели «интеллектуальной жидкости» применительно к движению людских потоков и к движению транспорта. Проанализированы их общие черты и отличия. Движение автомобильных потоков, в отличие от потоков людей, на перекрёстках и других участках дороги происходит посредством светофоров, дорожных знаков или полицейскими, а также регламентируются правилами дорожного движения.

Показана возможность решения конкретных задач и отмечено, что точность моделирования транспортных потоков может быть увеличена за счёт использования подходов, разработанных в теории движения людских потоков.

Предложено использование параметра организованности транспортного потока.

Предлагается расширить математический аппарат теории движения транспортных потоков использованием наработок теории движения людских потоков и наоборот. В интересах развития обеих теорий рассмотрены возможности других математических аппаратов, таких как: теории массового обслуживания, теории нечётких множеств и других.

**Ключевые слова:** Интеллектуальная жидкость, транспортный процесс, движение транспортных объектов, транспортный поток, шлюзовая система судопропуска, планирование и регулирование.

## THE DESCRIPTION OF THE TRANSPORT OBJECTS MOVEMENT VIA "INTELLECTUAL LIQUID" MODEL

**Olga Yu. Lukomskaya**

Phd, docent, Leading Researcher of Laboratory of Intelligent Transport Systems  
Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science  
13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation  
Associate Professor of the Department Ship Control Systems  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»  
5, Professora Popova street, St. Petersburg, 197376, Russian Federation  
e-mail: luol@mail.ru

**Vladimir I. Komashinskiy**

Dr.Sci. (Eng), Associate Professor, Deputy Director

Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science  
13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation  
E-mail: kama54@rambler.ru

**Aleksandr A. Tarantsev**

Dr.Sci.Tech, professor, Head of Laboratory of Vehicle Safety systems  
Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science  
13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation  
e-mail: info@iptran.ru@mail.ru

**Andrey A. Tarantsev**

Lecturer of the Academy State Fire Service of EMERCOME of Russia  
B.Galushkina str., 4, Moscow, 129366, Russian Federation  
e-mail: dask\_cradle@mail.ru

### Abstract

The article explores the movement of human flows in order to solve various applied problems. It is known that such flows resemble the flow of a special fluid called "intellectual" and obey certain laws, the speed of which depends on its density.

Comparative models of "intellectual fluid" are given in relation to the movement of human flows and to the movement of vehicles. Their general features and differences are analyzed. The movement of automobile flows, unlike the flows of people, at intersections and other sections of the road occurs through traffic lights, traffic signs or police officers, and is also regulated by the rules of the road.

The possibility of solving specific problems is shown and it is noted that the accuracy of modeling traffic flows can be increased through the use of approaches developed in the theory of the movement of human flows.

The use of the organization parameter of the traffic flow is proposed.

It is proposed to expand the mathematical apparatus of the theory of movement of traffic flows using developments from the theory of motion of human flows and vice versa. In the interests of the development of both theories, the possibilities of using other mathematical apparatuses, such as: queuing theory, fuzzy set theory and others, are considered.

**Key words:** Intellectual liquid, transport process, transport traffic, transport objects movement, gateway system of shipping, planning and control.

### Introduction

*The movement of different objects or participants of transportation movement, for example, people (e.g. during emergency evacuation from a building [1–4]), vehicles on the road's net [5–7], ships in gateway system of shipping [13, 14] undergo certain laws common to all above mentioned though different objects.*

Majority of national (V.M. Predtechensky, A.I. Milinsky, S.V. Belyaev etc. in case of crowd movement) and foreign scientists [3, 4, 6] think that such traffics strongly resemble the traffic of a liquid, but not the liquid of water, more precisely the special liquid known as "intellectual" one [8, 9].

#### 1. The description of pedestrian's traffic

The research of a crowd movement has been done to solve different practical tasks, one of a major is evacuation from a building in emergency case. The research stated that the velocity  $V$  of a crowd movement depends on its density  $D$  and types of track sections it moves along [8].

It should be mentioned that for a transportation system the movement of a crowd on the transport communication is commonly named by the term "passenger traffic". The research of the passenger traffic as a rule was done considering a certain amount of passengers, moving during certain time on a certain track segment in one direction (capacity of passenger traffic) and transported by means of transport during certain time (hour, 24 hours, month, year) (scope of passenger traffic), although the research did not take into consideration the peculiarities of pedestrian traffic or track segments [10–13, 21, 23].

For interdependence of  $V(D)$  different approximations were applied – polynomial, the power of a number etc., but eventually the following calculation with logarithms was accepted as a standard one:

$$V(D) = \begin{cases} V_0, & \text{при } D \leq D_0, \\ V_0 [1 + a \cdot \ln(D_0/D)], & \text{при } D > D_0 \end{cases}, (1)$$

where  $V_0$ ,  $a$  and  $D_0$  – setting of approximation characteristic for each group mobility of pedestrian and types of tracks – horizontal inside and outside a building, ramps, staircases and doorways [8].

The density of a traffic  $D$  can be identified as ratio of projection area, occupied by pedestrian, to floor area, where people are present:

$$D = \frac{F}{L \cdot \delta}, (2)$$

where  $F$  – general projection area of pedestrian;  $L$ ,  $\delta$  – length and width of the room (presumably, it is rectangular).

If there are a few moving crowds of people with different group mobility simultaneously, then the projection area  $F$  is the sum of projection areas of crowds with different group mobility of pedestrian:

$$F = \sum_{k=1}^5 N_{Mk} f_{Mk}, (3)$$

where  $N_{Mk}$  – the number of  $k$  i.e. of group mobility of pedestrian;  $f_{Mk}$  – average projection area of a member from  $k$  group mobility [8].

If in the same crowd there are pedestrian with bags and children, then their projection area is calculated the same as (3) with regard of projection areas in accordance with average horizontal projection of

people with bags and children estimated by R.G.Grigoriant [8], a group of mobility – M5.

Velocity  $V_i$  of mixed traffic of pedestrian on each –  $i$  segment of track is weighed average [2]:

$$V_i = \sum_{k=1}^5 w_k V_{ik}, i \in [1, n], \quad (4)$$

where  $V_{ik}$  – the speed pedestrian of  $k$ – group of mobility on a certain  $i$  – segment of track, and the speed is calculated according to (1);  $w_k$  – weight coefficient, calculated according to:

$$w_k = \frac{N_{Mk} f_{Mk}}{F}, k \in [1, 5]. \quad (4a)$$

An important parameter of pedestrian traffic is its intensity  $q$  – pedestrian traffic (in conversion to it's projection area) moving per certain time along certain length of  $i$ -track segment:

$$q_i = V_i D_i, i \in [1, n], \quad (5)$$

Where  $V_i, D_i$  – speed and density of traffic on a certain  $i$ -track segment. The interdependence of  $q(D)$  for groups of mobility M1 is showed in [8].

The total time of movement  $T$  is calculated with the times of movement on  $n$  segment of track:

$$T = \sum_{i=1}^n t_i, \quad (6)$$

where  $t_i$  – is the time of movement on  $i$ -track, which is calculated as ratio of the length of  $i$ -track  $L_i$  to the speed of movement on this segment of track:

$$t_i = \frac{L_i}{V_i} + \Delta t_i, i \in [1, n], \quad (7)$$

where  $\Delta t_i$  – is the duration of delay on  $i$ -track.

If from  $(i-1)$  first track with its width of  $\delta_{i-1}$  the traffic goes to  $i$ -track with the width  $\delta_i$ , then it is possible to calculate the intensity of movement  $q_i$  on this track:

$$q_i = q_{i-1} \delta_{i-1} / \delta_i. \quad (8)$$

If for  $i$ -track the traffic section condition is observed:

$$q_i \leq q_{max}, \quad (9)$$

then it is supposed that  $\Delta t_i = 0$ , and the velocity  $V_i$  is identified as interpolation in the table (GOST 12.1.004-91\* and GOST R 12.3.047-98), or graphically [2] – see for example fig. 1. In some cases an ambiguous situation may arise when there are two settings of intensity [1, 2] – see fig. 2.

If the pedestrian flow enters the room with the lesser width (the lane is narrowed) ( $\delta_i < \delta_{i-1}$ ), then the density of the traffic will increase to  $D_{\delta i}$ ; but the speed will become lesser  $V_6$ . If  $\delta_i > \delta_{i-1}$ , the density of the traffic will decrease to  $D_{mi}$ , but the velocity will increase to  $V_{mi}$ .

If the condition (9) is not complied, then in front of  $i$ -track the congestion of people will grow, which is highly undesirable. On the stage of building design the abovementioned problem can be eliminated by width enlargement  $\delta_{i+1}$  till the indicator which allow to comply with the condition (9).

In condition when the building is already used (theatre, historical building etc.), it is necessary to limit the quantity of people inside or take into consideration its delay of movement, calculated accordingly:

$$\Delta t_i = F \cdot \left( \frac{1}{q_c \delta_c} - \frac{1}{q_i \delta_i} \right), \quad (10)$$

where  $\delta_c$  – is the width of doorway or of next track in front of which there is a congestion;  $q_c$  – is the ultimate intensity which for the doorway with the width  $\geq 1,6$  m equals 8,5 m per min, and if the doorway is more narrow 1,6 m,  $q_c = 2,5 + 3,75 \cdot \delta_c$ , for the staircase downstairs – 7,2 m/min, for the staircase upstairs – 9,9 m/min. Calculated by the equation (10) the value of delay is incorporated into the equation (6).

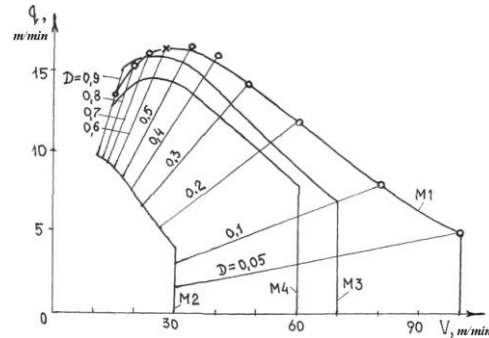


Fig. 1. Interdependence «intensity – velocity of pedestrian traffic of different types of mobility with regard of its traffic density on horizontal segment of track

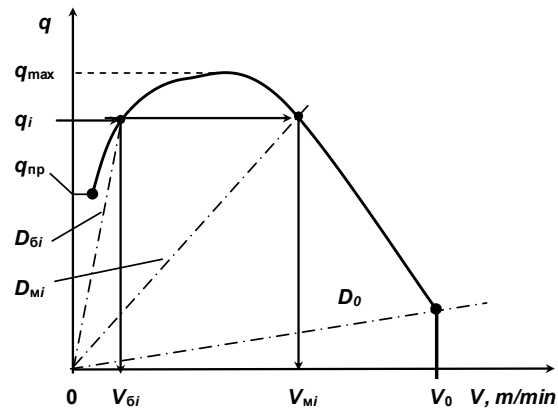


Fig. 2. Identification of people traffic with regard of two values of velocity for a given intensity:  $V_{\delta i}$  – velocity with bigger density of traffic  $D_{\delta i}$ ;  $V_{mi}$  – velocity with lesser density of traffic  $D_{mi}$ .

If there is a merge of  $p$  traffics, the intensity of movement  $q_i$  on this track is calculated the following way:

$$q_i = \frac{\sum_{j=1}^p q_j \delta_j}{\delta_i}. \quad (11)$$

Interdependence «intensity – velocity of movement» of people of different types of mobility with regard of its traffic density on horizontal segment of track.

### 1.1. Modelling of “chain” pedestrian traffic

When moving on narrow or slippery (in winter) segments of tracks people have to move in chain, which means follow each other without outrunning (fig. 3).

Considering that the speed of each  $i$ -person depends on the distance between this person and the one ahead going, so the coordinate of this person  $z_i$

can be calculated from the system of differential equations [2]:

$$\frac{dz_i}{dt} = f(z_{i-1} - z_i, f_{ni}), \quad i \in [1, N], \quad (12)$$

where  $t$  – is the time, going by from the start of movement on the track;  $N$  – is the number of people in “chain”;  $f_{ni}$  – is projection area of  $i$ -person;  $f()$  – function of velocity,  $z_0 > 5$  m – relative distance.

For major parts of escape routes the function  $f()$  can be calculated from the following equation (1):

$$f(z_{i-1} - z_i, f_{ni}) = V(D), \quad (13)$$

where  $D = f_{ni} [(z_{i-1} - z_i) \delta]^{-1}$  – is the relative density of people in a “chain”, with the use of which in equations (12) via numerical methods one can calculate the parameters of movement of 10 people of M1 mobility (or mixed mobility with regard of the confidence interval) in the train tunnel. As the initial conditions have it  $z_1=0$ , and the rest stay close to each other in line.

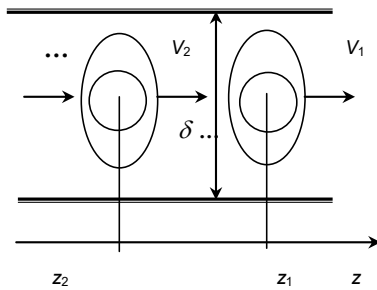


Fig. 3. “Chain” pedestrian traffic

The modelling showed that the movement of all “chain” is greatly determined by the parameters of the directing person. The latter will move with the greatest speed for the given segment of track.

In the fig. 4 there are parameters of “chain” movement, containing 10 pedestrian (directing – closing persons) for different segments of tracks.

As one can see the length of “chains” during movement is exponentially increasing and eventually reaches it’s constant value which can be calculated the following way:

$$L_u = (N - 1) f_n (D_0 \delta)^{-1} + \delta_4, \quad (14)$$

where  $\delta_4$  – is the «thickness» of a person.

Considering the equation (14) the time of covering  $i$ -segment of track by the closing perso from the “chain” can be calculated as follows:

$$t_i = (L_i + L_u) / V_0. \quad (15)$$

As one can see the length of “chains” during movement is exponentially increasing and eventually reaches it’s constant value which can be calculated the following way:

$$L_u = (N - 1) f_n (D_0 \delta)^{-1} + \delta_4, \quad (14)$$

where  $\delta_4$  – is the «thickness» of a person.

Considering the equation (14) the time of covering  $i$ -segment of track by the closing perso from the “chain” can be calculated as follows:

$$t_i = (L_i + L_u) / V_0. \quad (15)$$

Example. Along the horizontal track with the length  $L_i=50$  m and the width  $\delta=0,9$  m there should go a

“chain” of 10 people ( $N=10$ ) of mobile group M1. The task is to assess the time at which the whole “chain” covers this track, if  $\delta_4 \approx 0,5$  m.

Considering that people do not suffer from tiredness on such a segment of track and their sizes are comparatively the same so from the charts 1 and 2 [8]  $V_0 = 100$  m/min,  $f_n = 0,125$  m<sup>2</sup>,  $D_0 = 0,069$  with the use of (14) and (15) it is possible to calculate:  $t_i = [50 + 9 \cdot 0,125 \cdot (0,069 \cdot 0,9)^{-1} - 1 + 0,5] / 100 \approx 0,69$  min  $0,686$  min  $\approx 41,2$  sec.

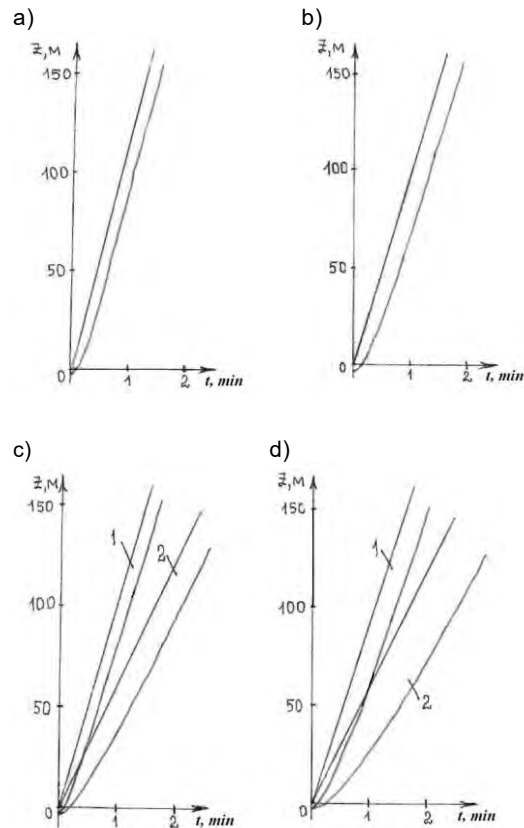


Fig. 4. Generic results of modelling of “chain” traffic containing 10 pedestrian (the lines – parameters of movement of leading and closing persons), (a) – horizontal way outside building; (b) – horizontal way inside building; (c) – staircase: ‘1’- up, ‘2’- down; (d) – tunnel: line ‘1’- without a train, ‘2’ – with a train

## 2. Transport traffic movement

As it was stated above the traffic of vehicle in many ways resembles the traffic of pedestrian (this fact was stated earlier in 70-s by professor V.V.Holschevnikov). The traffic as well as people traffic including “chain” pedestrian traffic can be seen as “intellectual liquid”, the velocity  $V$  of which depends on its density (herein the density  $\rho$  is the quantity of vehicles of one segment of motorway in one row). In the fig. 5 there are charts of “velocity-density” for pedestrian traffic and for vehicle traffic, which show the fact of high resemblance in process of movement (the vehicles are also driven by people).

In the theory of movement of vehicle traffic [5, 17, 20] it is accepted to use nomogram “intensity of movement – density of a traffic” (fig. 6).

The intensity  $q$  identifies the quantity of vehicles moving for certain time (usually per hour) in one row on



the road. In contrast to people traffic where there is a strict definition of mobile groups with corresponding parameters of movement, in the vehicle traffic there is a great variety of traffic means – from midget car to trailer car, the parameters of movement of which is hard to determine strictly. The apparent resemblance of nomograms (see chart 3 and chart 6 in [8]) serves as the additional proof of resemblance between movement process of people and vehicle traffics.

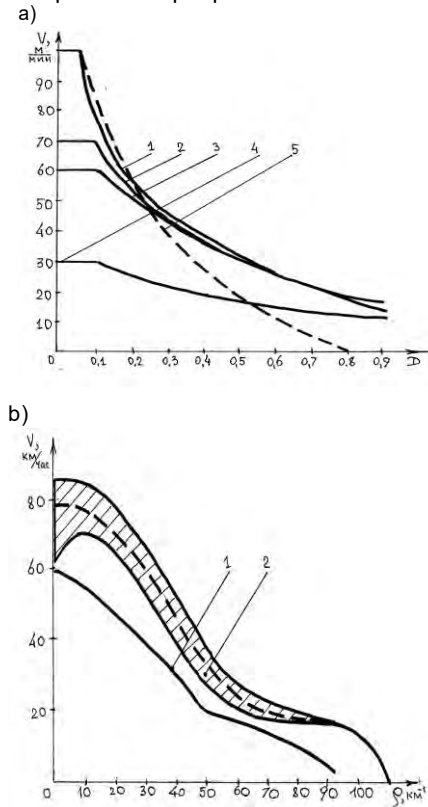


Fig. 5. Interdependence «velocity of traffic – density» for pedestrian traffic: (a) along the horizontal segment (the lines '1'- group M1, '2'- group M3, '3'- group M5, '4'- group M2, '5'- group M1 outside a building) and (b) the vehicle traffic [8].

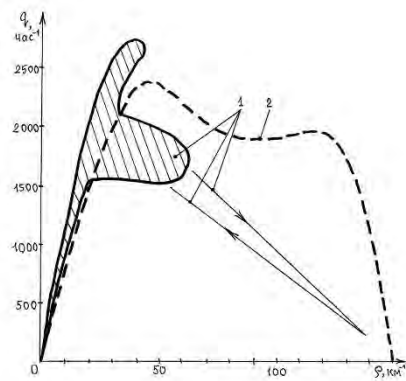


Fig. 6. Nomogram “intensity traffic – density of vehicle traffic”, the lines '1' – according to F. Ball [8], '2' – according to [5].

For the formal description of vehicle traffic in progress [5] it is common to show interdependence  $q(\rho)$  as parabolic, triangle etc. Nevertheless, vehicle traffic in comparison to people traffic possesses number of peculiarities. The main peculiarities are –

regulation of the traffics on crossroads and other parts of a road via traffic lights, road signs or policemen, and also there is traffic regulation (Traffic Regulation - 2015), which for example forbids to trucks to move in left hand lane on some parts of the road or imposes the priority of vehicles' movement etc.

Besides in the theory of vehicle traffic movement in contrast to people traffic there is not enough attention drawn to description of the process of parameters changing with regard of road's width changing (expanding or cutting of quantity of road's rows) and of traffic merging.

For example “Yandex congestion” service in on-line regime helps to monitor the vehicle traffic in the city and gives the opportunity for motorists to establish the optimal rout and to forecast the time to the point of destination. Although on the stage of projecting, reconstruction or modernizing of the street road's net this mobile on-line service as well as the analogous ones can not model (forecast) the movement of vehicle traffic. This task can be solved with the help of methods given in [5, 8, 10, 21] and similar literature. But the accuracy of vehicle traffic modeling can be increased with the help of approaches implemented in the theory of pedestrian traffic movement [1, 2, 9, 14].

### 3. Analysis of kinematical parameters of transport processes of ship traffic movement trough gateway system of shipping

Kinematical analyses is connected with the analyses of management of transport traffic movement along the transport communication, the subject of which is the transport traffic movement without taking into consideration its mass and forces, impacting it.

Carrying capacity of transport net and characteristics of cargo turn-over are the subject of kinematical transport process analyses [14].

Each communicative environment has its specific net infrastructure, the elements of which in its assembly in any cross-section possesses it's own carrying capacity, which is limited by the resource capability of each cross-section.

In any local cross-sections (sections as segments of net, routs of transport traffic, routs of movement from the channel to the traffic out) the carrying capacity is max intensity of transport traffic through the given cross-section limited by the resource capability of this cross-section.

In [17] it is showed that there is one more restriction, and the carrying capacity depends on the organized nature of traffic movement through the given cross-section.

Most generally the arguments of functional of transport net carrying capacity are intensity and level of organization of transport traffic in it. Mind that it is essential to discern physical carrying capacity  $P_\Phi$ , which is dependent on technical characteristics of transport net, and operating carrying capacity  $P_s$ , which is dependent on the organization level of transport traffic and ways of it's management [17–20, 22].

The measure of traffic organization –  $m$  depends on its time agreement and can be assessed indirectly as a share of non-productive  $T_{\text{нп}}$  (or non-technological) time waste from general crossing time  $T_x$ , otherwise it can be put the following way:

$$m = 1 - T_{\text{нп}}/T_x. \quad (16)$$

When  $m = 1$ , then  $T_{\text{нпр}} = 0$ , there is full integral consistency of opposed streams of traffic in the net, and it is characterized by lack of conflicts among transport means for control over transport resource, so then  $P_{\Phi} = P_{\Omega}$ . In practice as there are time delays so  $m < 1$  and subsequently  $P_{\Omega} < P_{\Phi}$ . In such a case there is a need of certain management of traffics that they would aim to return to balanced condition (or to the condition close to balanced). So that  $T_{\text{нпр}} \rightarrow 0$  и  $P_{\Omega} \rightarrow P_{\Phi}$ .

The dependence of carrying capacity of net from intensity of movement  $q$  and from organizational measure of traffic is showed in the equation [14, 17]:

$$\frac{P_{\Omega}}{P_{\Phi}} = \frac{d \times (1-d) \times (1 + \sqrt{m})}{(1 + (1-m) \times d)}. \quad (17)$$

Where a coefficient of load of the net –  $d$  is calculated as  $d = q/P_{\Phi}$ .

The figure of interdependence (fig. 7) shows that the figures of equation (16), corresponding to the balanced condition of the net are situated on the diagonal with different figures of load on the net [9].

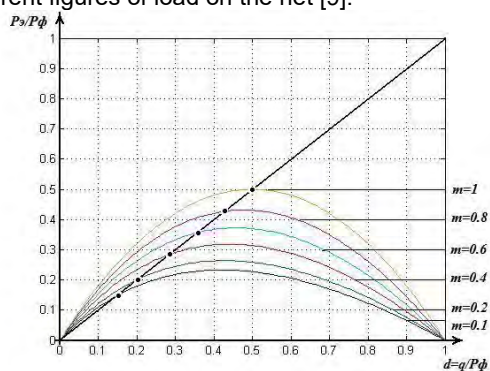


Fig. 7. The dependence of carrying capacity of the net from intensity of movement and from organizational measure of traffic

As an example, the movement of ships through gateway system of shipping is given in [18–20, 22].

In the basis of the model there is piecewise time approximation of function  $y(t)$  which describes differentiable curve of route, the step of discretization of which is  $T_{\text{quant}} = T_0 = 30$  min – average statistical time for ship maintenance in the service unit. The time interval between two transport means in the traffic should be not less than  $2T_0$ , and between two neighboring means of transport from opposed traffics not less than  $T_0$ . With consideration of speed limit of traffic in the net, the conditions of balancing of traffics can be calculated the following way [18–20, 22], these equations are based on the procedure of planning and regulation of traffic movement in the net.

## Conclusion

In the article the similarities and differences in the theories of pedestrian and transport traffics are showed. The level of organization of traffic is described. Mathematical tool of the theory of transport traffic movement can be enriched by the use of results from the theory of pedestrian traffic and vice versa. For the benefit of both theories the possibilities of usage of other mathematical tools can be applied, for example the tools of the theory of mass service [15], the tools of fuzzy-set theory ect. can be applied [16].

## Литература

1. Холщевников В. В., Самошин Д. А., Парфёненко А. П., Кудрин И. С., Истратов Р. Н., Белосохов И. Р. Эвакуация и поведение людей при пожарах. Учебное пособие. М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. 262 с.
2. Таранцев А. А.. Методы расчёта времени эвакуации людей из зданий и сооружений. Учебное пособие / под ред. проф. Артамонова В. С. – СПб.: СПбУ ГПС МЧС России, 2009. 42 с.
3. Gwynne, S.M.V. Optimizing fire alarm notification for high-risk groups. Summary Report, Prepared for The Fire Protection Research Foundation, June 2007, NFPA, Quincy, MA.
4. Hyun-Seung, H., C. Jun-ho, H. Won-Hwa. Calculating and verifying the stair-case-length for evacuation analysis, Pedestrian and Evacuation Dynamics, 2010 Conference, Springer, New York (2011), pp. 601—611.
5. Введение в математическое моделирование транспортных потоков. Учебное пособие / под ред. Гасникова А. В.. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: МЦНМО, 2013. 427 с.
6. Handbook of Transport Modelling, edited by David A. Hensher, Kenneth J. Button. – Pergamon, 2000.
7. Cascetta E. Transportation systems analysis. Models and applications. Springer, 2009. Optimization and application. V. 29.
8. Таранцев А. А., Нодь А. П., Tarantsev A. A. Применение модели «интеллектуальной жидкости» к описанию движения мобильных объектов. Интеллектуальные технологии на транспорте. 2016. № 2 (6). С. 5—11.
9. Таранцев А.А., Лукомская О. Ю., Васьков В. Т., Нодь А. П. Об описании движения транспортных объектов на основе модели "интеллектуальная жидкость". В сборнике: Транспорт России: проблемы и перспективы - 2016. Материалы Международной научно-практической конференции. 2016. С. 237-247.
10. Варелопуло Г. А. Организация движения и перевозок на городском пассажирском транспорте. – М.: Транспорт, 1990. – 200 с.
11. Спиринов И. В. Перевозки пассажиров городским транспортом: Справочное пособие. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. —413 с.
12. Бруснянин Д.А., Казаков А.Л. Определение интегрального пассажиропотока на территории региона Транспорт Урала. 2012. № 2. С. 90-93.

13. Жарков М.Л. Математическая модель и программный комплекс для определения статистических параметров пассажиропотоков в транспортных системах. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2 (133). С. 45-56.
14. Холщевников В. В. Психофизиологические закономерности поведения людей при движении в пешеходных потоках // Пожаровзрывобезопасность. 2005. Т. 14. № 4. С. 38—49.
15. Таранцев А. А. Инженерные методы теории массового обслуживания. Монография. Изд. 2-е, перераб. и доп. СПб.: 2007. 175 с.
16. Таранцев А. А., Ширинкин П. В. Применение теории нечетких множеств к решению пожарно-тактических задач // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19. № 8. С. 59—63.
17. Попов С. А., Трифанов В. Н. Самоорганизация в коммуникационных средах. – СПб.: Сборник избранных трудов IV Международного конгресса РАН, 2006. <http://www.biophys.ru/chive/congress2006/pro-p145.pdf>.
18. Лукомская О.Ю., Трифанов В.Н. Об управлении движением транспортных потоков // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2009. № 5. С. 39–44.
19. Seliverstov S., Seliverstov Y., Lukomskaya O., Asaul M. Development of the simulation of management of the lock control system Volga-Don channel. Scientific journal "Marine intelligent technologies" № 3(37) vol 3 2017. Pp. 105–114.
20. Лукомская О. Ю. Модели и алгоритмы оптимальности регулярных транспортных потоков с использованием интеллектуальных систем управления судопропуском // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». 2014. № 5. С. 34—37.
21. Seliverstov Y.A., Seliverstov S.A., Lukomskaya O.Y., Nikitin K.V., Grigoriev V.A., Vydrina E.O. The method of selecting a preferred route based on subjective criteria. In: Proceedings of 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS), CTS 2017. 2017. Pp. 126-30.
22. Lukomskaya Olga Yu., Seliverstov Svyatoslav A., Seliverstov Yaroslav A., Shatalova Natal'ya V. About development and testing of the schedule planning algorithm on the vessel traffic via the system of the volgo-baltic shipping channel. Marine intelligent technologies. № 4(38) , vol 3, 2017. p. 115–126.
23. Seliverstov Y.A., Seliverstov S.A., Malygin I.G., Tarantsev A.A., Shatalova N.V., Lukomskaya O.Y., Tishchenko I.P., Elyashevich A.M. Development of management principles of urban traffic under conditions of information uncertainty. Communications in Computer and Information Science 2017. 754. Pp. 399-418.

#### References

1. Xolshhevnikov V. V., Samoshin D. A., Parfyonenko A. P., Kudrin I. S., Istratov R. N., Belosoxov I. R. E`vakuaciya i povedenie lyudej pri pozharax. Uchebnoe posobie. M.: Akademiya GPS MChS Rossii, 2015. 262 s.
2. Tarancev A. A. Metody` raschyota vremeni e`vakuacii lyudej iz zdaniy i sooruzhenij. Uchebnoe posobie / pod red. prof. Artamonova V. S. SPb.: SPbU GPS MChS Rossii, 2009. 42 s.
3. Gwynne, S.M.V. Optimizing fire alarm notification for high-risk groups. Summary Report, Prepared for The Fire Protection Research Foundation, June 2007, NFPA, Quincy, MA.
4. Hyun-Seung, H., C. Jun-ho, H. Won-Hwa. Calculating and verifying the stair-case-length for evacuation analysis. Pedestrian and Evacuation Dynamics, 2010 Conference, Springer, New York (2011), p. 601-611.
5. Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie transportny`x potokov. Uchebnoe posobie pod red. Gasnikova A. V.. Izd. 2-e, pererab. i dop. M.: MCzNMO, 2013. 427 s.
6. Handbook of Transport Modelling, edited by David A. Hensher, Kenneth J. Button. Pergamon, 2000.
7. Cascetta E. Transportation systems analysis. Models and applications. Springer, 2009. Optimization and application. V. 29.
8. Tarantsev A. A., Nod` A. P., Tarantsev And. A. Application of Model «Intellectual Liquid» to the Description of the Movement of Mobile. Intellectual Technologies on Transport. Issue No 2, 2016. p. 5-11.
9. Tarantsev Alexander A., Vas`koff Victor T., Lukomskaya Olga Yu., Nod` Alexander P. The description of the motion of transport facilities based on the model "intellectual liquid". V sbornike: Transport Rossii: problemy` i perspektivy` - 2016. Materialy` Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2016. S. 237-247.
10. Varelopulo G. A. Organizaciya dvizheniya i perevozok na gorodskom passazhirskom transporte. Moskva: Transport, 1990. 200 s.
11. Spirin I. V. Perevozki passazhirov gorodskim transportom: Spravochnoe posobie. Moskva: IKCz Akademkniga, 2004. 413 s.
12. Brusyanin D.A., Vikharev S. V., Popov V. Y., Gorbenko A. A., Sheka A. S. Intelligent system monitoring passenger transport complex of the region. Innovation transport. 2012. № 2. p. 41-43.
13. Zharkov M. L. Mathematical model and program complex to determine statistical parameters of passenger flows in transport systems. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018. V. 22. № 2 (133). p. 45-56.
14. Kholshchevnikov V.V. Experimental researches of pedestrian flows moving along staircase of a multi-storey building. 2015. Т. 10. № 21. p. 42549-42552.
15. Tarancev A. A. Inzhenerny`e metody` teorii massovogo obsluzhivaniya. Monografiya. Izd. 2-e, pererab. i dop. SPb.: 2007. 175 s.
16. Tarancev A. A., Shirinkin P. V. Primenenie teorii nechetkix mnozhestv k resheniyu pozharno-takticheskix zadach.. Pozharovzryvobezопасnost`. 2010. Т. 19. № 8. s. 59-63.
17. Popov S. A., Trifanov V. N. Samoorganizaciya v kommunikacionny`x sredax. SPb.: Sbornik izbranny`x trudov IV Mezhdunarodnogo kongressa RAN, 2006. <http://www.biophys.ru/archive/congress2006/pro-p145.pdf>
18. Lukomskaya O., Trifanov V. About traffic control (About management movement of transport streams) Izvestiya SpbGetu "Leti". 2009. № 5. p. 39-44.

19. Seliverstov S., Seliverstov Y., Lukomskaya O., Asaul M. Development of the simulation of management of the lock control system Volga-Don channel. Marine intelligent technologies. № 3(37), vol 3, 2017. p. 105–114.
20. Lukomskaya O. Models and algorithms of optimality of regular traffic flows using intelligent navigation pass control systems. Izvestiya SpbGetu "Leti". 2014. № 5. p. 34-37.
21. Seliverstov Y.A., Seliverstov S.A., Lukomskaya O.Y., Nikitin K.V., Grigoriev V.A., Vydrina E.O. The method of selecting a preferred route based on subjective criteria. In: Proceedings of 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS), CTS 2017. 2017. p. 126-30.
22. Lukomskaya Ol'ga Yu., Seliverstov Svyatoslav A., Seliverstov Yaroslav A., Shatalova Natal'ya V. About development and testing of the schedule planning algorithm on the vessel traffic via the system of the volgo-baltic shipping channel. Marine intelligent technologies. № 4(38) , vol 3, 2017. p. 115–126.
23. Seliverstov Y.A., Seliverstov S.A., Malygin I.G., Tarantsev A.A., Shatalova N.V., Lukomskaya O.Y., Tishchenko I.P., Elyashevich A.M. Development of management principles of urban traffic under conditions of information uncertainty. Communications in Computer and Information Science 2017. 754. p. 399-418.

УДК 621.3.078

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВЕ СИНХРОННЫХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ И АДАПТИВНЫХ ПИД РЕГУЛЯТОРОВ

**Леонид Андреевич Краснодубец**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Судовое электрооборудование»  
Севастопольский государственный университет  
299053, Севастополь, ул. Университетская, 33,  
главный научный сотрудник Института природно-технических систем  
299011, Севастополь, ул. Ленина, 28  
e-mail: lakrasno@gmail.ru

**Светлана Андреевна Конева**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Судовое электрооборудование»  
Севастопольский государственный университет  
299053, Севастополь, ул. Университетская, 33  
e-mail: ksa2602@mail.ru

**Владимир Муратович Цалоев**

старший преподаватель кафедры «Судовое электрооборудование»  
Севастопольский государственный университет  
299053, Севастополь, ул. Университетская, 33  
e-mail: 1.\_@mail.ru

**Анна Константиновна Пронина**

старший преподаватель кафедры «Судовое электрооборудование»  
Севастопольский государственный университет  
299053, Севастополь, ул. Университетская, 33  
e-mail: pronina-a@bk.ru

### Аннотация

Ставится и решается задача проектирования адаптивных ПИД регуляторов для управления электроприводами, построенными на базе синхронных машин с возбуждением от постоянного магнита, размещённого на роторе. При этом в качестве исполнительных двигателей электроприводов используются разновидности синхронной машины: вентильные двигатели и бесконтактные двигатели постоянного тока. Методика синтеза адаптивного ПИД регулятора, используемого для обоих типов исполнительных двигателей, основана на решении обратной задачи динамики с эталонной моделью в сочетании с локальной оптимизацией. Искомые параметры настройки регулятора являются коэффициентами эталонной модели и не зависят от параметров синхронной машины. Процедуры синтеза и моделирования, оформленные в виде программы, используют виртуальные модели источников напряжения, инверторов и синхронных машин из библиотеки "SimPowerSystems". Результаты проектирования представлены в виде графиков переходных характеристик электроприводов с традиционным и адаптивным регулятором. Показано, что электропривод с адаптивным ПИД регулятором обладает большим быстродействием и характеризуется отсутствием динамической и статической ошибки от возмущающего момента.

**Ключевые слова:** синхронная машина, электропривод, регулятор, управление, виртуальная модель, цифровое проектирование, математическая модель, синтез.

## DESIGNING OF ELECTRIC DRIVE BASED ON PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINES WITH ADAPTIVE PID CONTROLLERS

**Leonid A. Krasnodubets**

doctor of technical Sciences, Professor, professor of the department «Ship's electric equipment», Sevastopol State University, Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation,  
Chief Researcher of the Institute of Natural and Technical Systems,  
Lenin St., 28, Sevastopol, 299011, Russian Federation  
e-mail: lakrasno@gmail.ru

**Svetlana A. Koneva**

candidate of technical sciences, associate professor, head of the department «Ship's electric equipment», Sevastopol State University, Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation  
e-mail: ksa2602@mail.ru

**Vladimir M. Tsalojev**

senior lecturer of the department «Ship's electric equipment»,  
Sevastopol State University, Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation  
e-mail: 1.\_@mail.ru

**Anna K. Pronina**

senior lecturer of the department «Ship's electric equipment»,

Sevastopol State University, Universitetskaya St., 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation  
e-mail: pronina-a@bk.ru

### Abstract

The problem of designing adaptive PID controllers for controlling electric drives built on the basis of synchronous machines with excitation from a permanent magnet placed on the rotor is posed and solved. In this case, the types of synchronous machine are used as the executive motors of electric drives: valve electric motors and non-contact DC motors. The synthesis technique of the adaptive PID controller used for both types of electric drives is based on solving the inverse dynamics problem with a reference model in combination with local optimization. The required controller settings are the coefficients of the reference model and are independent of the parameters of the synchronous machine. Synthesis and modeling procedures, designed as a program, use virtual models of voltage sources, inverters, and synchronous machines from the "SimPowerSystems" library. Design results are presented in the form of graphs of transient characteristics of electric drives with a traditional and adaptive controller. It is shown that an electric drive with an adaptive PID controller has a more quick action and is characterized by the absence of dynamic and static errors from a disturbing torque.

**Keywords:** synchronous machine, electric drive, controller, virtual model, digital design, mathematical model, synthesis.

### Введение

Развитие технологий производства мощных постоянных магнитов на основе использования редкоземельных элементов и технологий создания твердотельных управляемых устройств для коммутации электрических цепей привело к своеобразному ренессансу синхронных машин с ротором из постоянного магнита (СМПМ). Новое поколение магнитоэлектрических синхронных машин успешно применяется для создания вентильных двигателей (ВД) и бесконтактных электрических двигателей постоянного тока (БДПТ), которые пришли на замену традиционным двигателям постоянного тока (ДПТ) со щётчным коллектором. Предназначенные для работы в составе электроприводов автономных объектов, где в качестве электропитания используются аккумуляторные батареи, ВД и БДПТ обладают более высокими динамическими характеристиками и показателями надёжности по сравнению с традиционными ДПТ [1]. При этом открываются новые направления и возможности совершенствования приводов постоянного тока автономных объектов в части повышения их быстродействия, точности, КПД, надёжности и безопасности эксплуатации. Однако сложные конструкции СМПМ и соответствующие алгоритмы функционирования построенных на их основе ВД и БДПТ, представляющих собой нелинейные динамические системы с вращающимися механическими элементами и магнитными полями, перекрёстными и обратными связями нуждаются в адекватном математическом описании, пригодном для эффективного проектирования и программирования микроконтроллеров – регуляторов для систем управления электроприводами автономных объектов. Для этой цели в настоящее время используют, как правило, модели обобщённой двухфазной машины переменного тока, а в качестве математического описания электромагнитных процессов используют уравнения Парка-Горева [2]. Такой подход, несмотря на ряд идеализирующих модель допущений, позволяет рассматривать индуктивности, входящие в эти уравнения как параметры, которые не зависят от времени, что существенно упрощает структуру моделей ВД и БДПТ, а также их практическое применение для

синтеза регуляторов систем управления электроприводами. В настоящее время наиболее популярный подход для решения этой проектной задачи сводится к упрощению математического описания ВД и БДПТ путём замены модели, построенной на базе системы уравнений Парка – Горева, моделью в виде передаточной функции эквивалентного ДПТ [3]. Это позволяет применять простые методы синтеза П и ПИ регуляторов для построения САУ электроприводом. При этом простота процедуры проектирования достигается за счёт существенного огрубления его математической модели, которая не учитывает динамики автономного инвертора, коммутатора, а также перекрёстных связей. Известны другие примеры использования ПИ регуляторов для управления СМПМ [4].

Наряду с исследованиями по упрощению моделей и процедур для проектирования приводов на базе СМПМ, ведутся исследования по разработке полевых моделей [5], снимающих ряд ограничений при их описании. Такие модели могут работать в режиме реального времени и использоваться для решения задач параметрической идентификации [6], однако требуют использования микроконтроллеров с высокой производительностью.

Развитие технологий цифрового проектирования привело к появлению виртуальных моделей – цифровых моделей совершенно новых форм и содержания, предназначенных для визуального моделирования, основанного на использовании структурных схем и правил их коммутации с учётом функциональных свойств составляющих их элементов, относящихся к электротехнической области [7]. Виртуальные модели могут использоваться не только для моделирования процессов в динамических объектах, например, в СМПМ, в системах управления ВД и БДПТ, но также для решения проектных задач и, в частности, синтеза параметров регуляторов, предназначенных для электроприводов автономных объектов.

Целью статьи является разработка алгоритма и соответствующей программы в среде MATLAB & Simulink для синтеза параметров и моделирования адаптивного ПИД регулятора, обеспечивающего повышение быстродействия и динамической

точности электроприводов постоянного тока с обратной связью, построенных на базе СМГМ, по сравнению с динамическими характеристиками аналоговичных приводов, спроектированных традиционными методами. При этом рассматриваются электроприводы с ВД и БДПТ.

**1. Метод синтеза адаптивного ПИД регулятора для управления динамическим объектом**

Пусть динамический объект управления (ДОУ) описывается дифференциальным уравнением с начальными условиями

$$\ddot{\omega} + a_1\dot{\omega} + a_0\omega = b_0u, \quad t = 0: \omega(0) = \omega_0, \dot{\omega}(0) = \dot{\omega}_0, \quad (1)$$

где  $\omega$  – управляемая переменная (выход);

$u$  – управляющее воздействие (вход);  $a_1, a_0$  – параметры модели ДОУ, значения которых не определены;  $b_0$  – коэффициент передачи ДОУ, значение которого может быть найдено экспериментально.

Ставится задача – найти управление  $u(\omega, \dot{\omega}, t)$  в форме обратной связи, которое обеспечит перевод ДОУ из начального состояния (1) в заданное стационарное состояние  $\omega(t) = \bar{\omega}; \dot{\omega}(t) = 0$ . При этом требуется, чтобы процессы  $\omega(t) \rightarrow \bar{\omega}; \dot{\omega}(t) \rightarrow 0$  в замкнутой системе

$$\ddot{\omega} + a_1\dot{\omega} + a_0\omega = b_0u_1(\omega, \dot{\omega}, t), \quad t > 0$$

проходили в малой окрестности эталонных процессов  $\omega^*(t) \rightarrow \bar{\omega}; \dot{\omega}^*(t) \rightarrow 0$ , формируемых эталонной моделью

$$\ddot{\omega}^* + \alpha_1\dot{\omega}^* + \alpha_0\omega^* = \alpha_0\bar{\omega}; \quad \alpha_0, \alpha_1 = const > 0, \quad (2)$$

определяющей желаемые свойства проектируемой системы, а степень приближения этих процессов оценивалась значением функционала

$$G(u) = 0,5[\ddot{\omega}^*(t) - \ddot{\omega}(t, u_1)]^2, \quad t \geq 0, \quad (3)$$

где  $\ddot{\omega}^*$  и  $\ddot{\omega}$  – вторые производные соответственно эталонного процесса и управляемой переменной.

Выражение искомого управления, найденного градиентным методом при минимизации (3), с учётом (2) и (3) имеет вид

$$u(t) = K[\alpha_0 \int_0^t (\bar{\omega} - \omega) d\tau - \alpha_1\omega - \dot{\omega}], \quad K = \lambda b_0, \quad (4)$$

По выражению (4), определяющему закон адаптивного управления, построена S-модель адаптивного ПИД регулятора (А регулятора), которая изображена на рис.1, где вместо идеального дифференцирующего звена введено реальное с постоянной времени  $T_D$ .

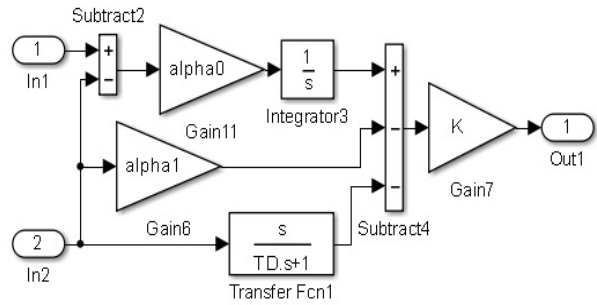


Рис. 1. Simulink-модель А регулятора.

Как следует из рис. 1, синтезированная структура содержит все элементы ПИД регулятора, но порядок их соединения отличается от его традиционной схемы. Параметры А регулятора имеют следующие смысловые значения:  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$  – коэффициенты эталонной модели;  $\lambda$  – постоянная градиентного метода;  $b_0$  – коэффициент передачи ДОУ.

**2. Синтез параметров А регулятора и моделирование электропривода с ВД**

Рассмотрим решение задачи синтеза А регулятора как модернизацию существующей двухконтурной системы управления скоростным электроприводом с двумя регуляторами, построенной на базе ВД во вращающейся системе координат  $d-q$  с безынерционным каналом «датчик положения ротора – преобразователь координат» и приведенной в виде виртуальной модели [3], созданной средствами пакета SimPowerSystems в среде Simulink. [7] На рис. 2 представлена модернизированная структура этой системы, в составе которой один контур и один А регулятор.

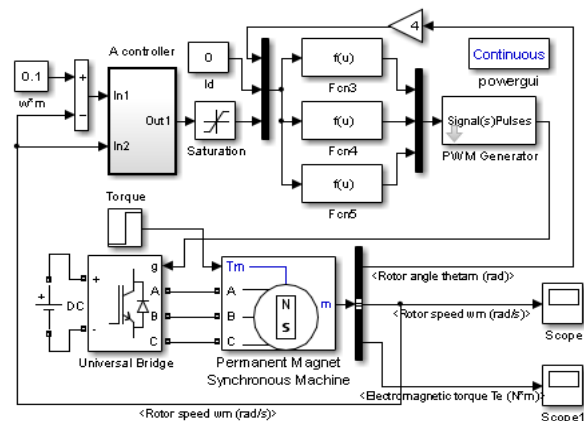


Рис. 2. Виртуальная модель модернизированной одноконтурной САУ скоростным электроприводом на базе ВД с А регулятором.

Модель содержит трёхфазную СМГМ (*Permanent Magnet Synchronous Machine*), управляемую от трёхфазного автономного инвертора (*Universal Bridge*), блок управления инвертором с синусоидальной ШИМ (*PWM Generator*) и преобразователь координат  $dq-ABC$  (блоки  $Fcn3, Fcn4, Fcn5$ ), в которых реализуются зависимости

$$\begin{aligned} u_A^* &= u_d^* \cos\theta + u_q^* \sin\theta, \\ u_B^* &= u_d^* \cos(\theta - 2\pi/3) + u_q^* \sin(\theta - 2\pi/3), \\ u_C^* &= u_d^* \cos(\theta + 2\pi/3) + u_q^* \sin(\theta + 2\pi/3). \end{aligned}$$

В блоке *Universal Bridge* выполняется усиление входных сигналов в  $K_{cp}$  раз.

В блоке *A controller* реализуется закон адаптивного управления (4), представленный на рис. 2 в виде структурной схемы (S-модели) с параметрами А регулятора:  $\alpha_0, \alpha_1, K = \lambda b_0, T_D$ , которые подлежат расчёту исходя из требуемых показателей качества проектируемого электропривода. В качестве таких показателей примем время установления переходной характеристики  $-t_p$  и перерегулирование  $-\sigma$ .

В рассматриваемом случае установим  $t_p = 0,005$  с, что соответствует времени переходной характеристики исходной двухконтурной САУ скоростным электроприводом [3]. Величину перерегулирования ограничим значением  $\sigma < 5\%$ .

Далее в соответствии с рекомендациями [8] выберем эталонную модель второго порядка и найдём её параметры, используя соотношения

$$\alpha_0 = 1/\tau^2; \quad \alpha_1 = 2\zeta/\tau, \quad \text{где } \tau = t_p / 8,4 -$$

обобщенная постоянная времени эталонной модели (2), определяющей длительность и перерегулирование переходного процесса, соответствующего при  $\zeta = 0,707$  критерию технического оптимума.

Параметр  $b_0$  можно определить при помощи регулировочной характеристики ВД. Для этой цели виртуальную модель (рис.2) следует преобразовать, удалив цепь обратной связи по угловой скорости.

Параметр  $\lambda$  вычисляется по формуле [8]

$\lambda = 3/(b_0^2 t_{pa})$ , где  $t_{pa}$  – время адаптации, которое определяется из соотношения  $t_{pa} = 0,1 t_p$ .

Постоянная времени  $T_D$  определяется неравенством  $T_D < \tau/100$ .

На рис. 3 приведены графики переходных характеристик. В момент  $t_m = 0,01$  с на оба привода производится наброс нагрузки (момента).

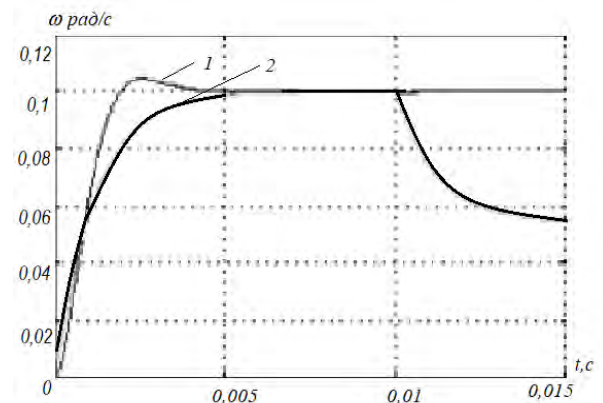


Рис. 3. Графики переходных характеристик электроприводов с ВД и различными регуляторами:

1 – с А регулятором; 2 – с двумя П регуляторами.

Из графиков на рис. 3 следует, что электропривод с ВД и адаптивным регулятором обладает несколько большим быстродействием и практически полностью компенсирует действие возмущающего момента, приложенного к его валу.

### 3. Синтез параметров А регулятора и моделирование электропривода с БДПТ

Рассмотрим виртуальную модель одноконтурной системы управления скоростным электроприводом с БДПТ и ПИ регулятором в контуре управления, приведенную в [3]. Структурная схема этой виртуальной модели представлена в виде *Simulink*-модели на рис. 4.

В рассматриваемой системе инвертор (*Universal Bridge*) выполняет функцию коммутирующего транзисторного устройства, управляемого формирователем импульсов (*Subsystem*), открывающих транзисторы на время  $a = 120^\circ$ .

При этом напряжение на выходе инвертора изменяется источником регулируемого напряжения (*Controlled Voltage Source*) подключённого к входной цепи постоянного тока инвертора и, в свою очередь, управляемого традиционным ПИ регулятором, на вход которого поступает сигнал ошибки управления.



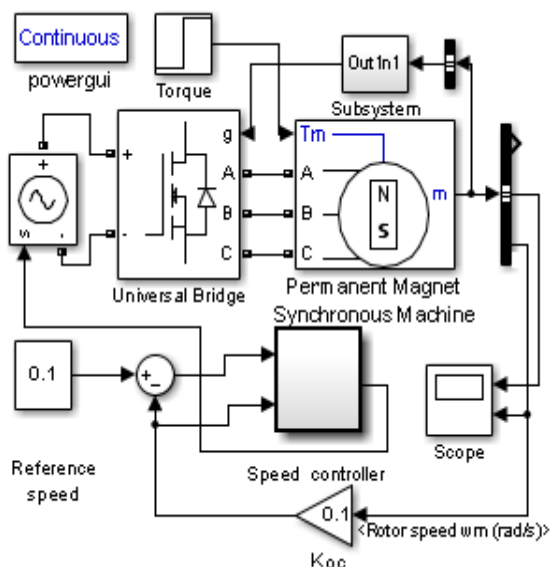


Рис. 4. Виртуальная модель электропривода с БДПТ и адаптивным регулятором

Для синтеза этого ПИ регулятора разработана упрощённая модель БДПТ путём замены его эквивалентным ДПТ. Очевидно, что параметры ПИ регулятора, найденные по весьма приближённой модели, не обеспечат хорошего качества проектируемого электропривода и применение дорогостоящих СМГМ будет малоэффективным.

Покажем, как в условиях отсутствия адекватного математического описания можно использовать адаптивный А регулятор. Для этой цели воспользуемся результатами проектирования электропривода с ВД, выполненного в п. 2. При этом заменим ПИ регулятор на А регулятор, как показано на рис. 4, и выполним расчёт параметров его настройки, полагая желаемое время переходной характеристики проектируемого электропривода равным аналогичному показателю привода, приведенного в [3], то есть  $t_p = 0,25$  с и при этом выберем время адаптации  $t_{pa} = 0,005t_p$ .

### Литература

- Иштуinov В.В. Анализ и оптимизация вентильного электродвигателя для высокودинамичного электропривода: дис. канд. техн. наук. Киров. 2015. 192 с.
- Курносое Д.А. Развитие теории и принципов векторного управления вентильным электроприводом на базе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов: дис. докт. техн. наук. Челябинск. 2018. 220 с.
- Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Изд-во «Корона-Век». 2014. 368 с.
- Kaushik J., Pradip K.S., Goutam K.P. Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based On Sinusoidal Pulse Width Modulated Inverter with Proportional Integral Controller // Int. Journal of Engineering Research and Applications. – 2013. – Vol. 3, Issue 5. – P. 913–917.
- Hiren M., Pankit T., Hemangini V. Comparative study of field oriented control and direct torque control of induction motor // Journal of information knowledge and research in electrical engineering. – 2011. – V. 1. – № 2. – P. 44–50.
- Мартынов В.А., Голубев А.Н., Алейников А.В. Разработка уточненной математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами для расчетов в реальном времени // Вестник ИГЭУ.– 2017.– Вып. 5. – С. 37-43.
- Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / Под общ. ред. В.Г. Потёмкина. – М.: Диалог – МИФИ, 2004. – 496 с.
- Краснодубец Л.А., Олейников А.М. ПИД регулятор как платформа для реализации адаптивных законов управления электроприводом // МАУ. – М.: Новые технологии, 2016. – Т.17, №12.– С. 809-816.

Результаты сравнительного моделирования двух электроприводов с БДПТ и различными регуляторами приведены на рис. 5.

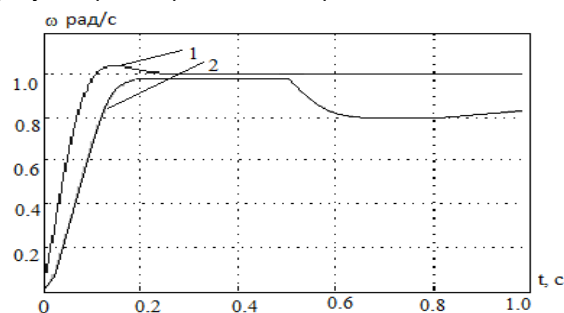


Рис. 5. Графики переходных характеристик электроприводов с БДПТ и различными регуляторами:

1 – с А регулятором; 2 – с ПИ регулятором.

### Заключение

Применение адаптивных ПИД регуляторов (А регуляторов) для управления скоростными приводами, построенными на базе СМГМ, может быть весьма эффективным в отдельных случаях, когда они приходят на замену традиционным П, ПИ или ПИД регуляторам в процессе модернизации существующих электроприводов. Такая замена, как следует из рис. 3 и рис.5, повышает быстродействие и точность электропривода. При этом для синтеза параметров настройки адаптивного регулятора не требуется знание математической модели применяемого СМГМ, а проверка работоспособности может быть проведена при помощи виртуальных моделей, поставляемых фирмой *The MathWorks* или другим разработчиком.

Расчёт параметров адаптивных регуляторов и моделирование электропривода проводились в среде MATLAB & Simulink при помощи разработанной программы, с графическим интерфейсом GUI.

### References

1. Ishutinov V.V. Analiz i optimizacija ventil'nogo jelectroprivoditelja dlja vysokodinamichnogo jelectroprivoda: dis. kand. tehn. nauk. Kirov. 2015. 192 s.
2. Kurnosov D.A. Razvitie teorii i principov vektornogo upravlenija ventil'nym jelectroprivodom na baze sinhronnogo dvigatelja s vozbuzhdeniem ot postojannyh magnitov: dis. dokt. tehn. nauk. Cheljabinsk. 2018. 220 s.
3. German-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Proektirovanie mehatronnyh sistem na PK. SPb.: Izd-vo «Korona-Vek». 2014. 368 s.
4. Kaushik J., Pradip K.S., Goutam K.P. Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based On Sinusoidal Pulse Width Modulated Inverter with Proportional Integral Controller // Int. Journal of Engineering Research and Applications. – 2013. – Vol. 3, Issue 5. – R. 913–917.
5. Hiren M., Pankit T., Hemangini V. Comparative study of field oriented control and direct torque control of induction motor // Journal of information knowledge and research in electrical engineering. – 2011. – V. 1. – № 2. – P. 44–50.
6. Martynov V.A., Golubev A.N., Alejnikov A.V. Razrabotka utochnennoj matematicheskoj modeli sinhronnogo dvigatelja s postojannyimi magnitami dlja raschetov v real'nom vremeni // Vestnik IGJeU. – 2017. – Vyp. 5. – S. 37–43.
7. Chernyh I.V. SIMULINK: sreda sozdanija inzhenernyh prilozhenij / Pod obshh. red. V.G. Potjomkina. – M.: Dialog – MIFI, 2004. – 496 s.
8. Krasnodubec L.A., Olejnikov A.M. PID reguljator kak platforma dlja realizacii adaptivnyh zakonov upravlenija jelectroprivodom // MAU. – M.: Noveye tehnologii, 2016. – T. 17, № 12. – S. 809–816.

УДК 004.02

## МЕТОД «КОНЕЧНОГО ПОВОРОТА И СМЕЩЕНИЯ» ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ КИНЕМАТИКИ ДЛЯ МАНИПУЛЯТОРОВ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ ЗВЕНЬЯМИ

Александр Владимирович Данилов

младший научный сотрудник

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, дом 5, с. 1

E-mail: 157304@rambler.ru

### Аннотация

В статье рассматривается итерационный метод решения обратной задачи кинематики (ОЗК) для манипуляторов с последовательно соединенными звеньями. Метод основан на кинематических свойствах манипулятора последовательной структуры, а именно: кинематическая пара пятого класса, вид соединения в паре (шарнир, призма), произвольная ориентация оси и звена в абсолютной системе координат, представленная в виде единичного вектора оси и вектора звена соответственно. Используется ортогональное преобразование векторов с помощью матрицы поворота относительно произвольной оси. Основой метода является точное и оптимальное определение значения каждого итерационного шага для каждой степени подвижности, способствующего максимальному приближению конечного звена (схвата) к заданным параметрам. Метод, названный методом «конечного поворота и смещения» (МКПС), разработан с использованием теорем, которые в совокупности обладают свойством непротиворечивости, независимости и полноты. Разработаны также методика и алгоритм решения ОЗК. По алгоритму метода МКПС разработано программное обеспечение (ПО)<sup>1</sup> решения ОЗК, структура которого формируется из модулей общей части алгоритма в виде динамически подключаемой библиотеки и индивидуальной для конкретного манипулятора в виде исходных данных. Исходными данными являются векторная модель манипулятора, значения конструктивных ограничений обобщенных координат и признаки, отображающие свойства кинематических пар по виду и по классу. В зависимости от вида сингулярных точек прохождение через них обеспечивается малым изменением конфигурации манипулятора или заданием обобщенных координат, обеспечивающих предсказуемое движение звеньев манипулятора в окрестности сингулярных точек. Метод не имеет проблем сходимости и может быть использован для манипуляторов с большим числом степеней подвижности при управлении в режиме реального времени.

**Ключевые слова:** манипулятор, кинематические пары, обратная задача кинематики, конечный угол поворота, конечное смещение.

## “FINITE ROTATION AND DISPLACEMENT METHOD” FOR SOLVING INVERSE KINEMATICS FOR ROBOT MANIPULATORS WITH SERIES- CONNECTED LINKS

Alexander V. Danilov

Junior Researcher

Bauman Moscow State Technical University

2nd Baumanskaya st., 5/1, Moscow, Russia, 105005,

E-mail: 157304@rambler.ru

### Abstract

The article considers the iterative method for solving the inverse kinematics (IK) for robot manipulators with series-connected links. The method is based on kinematics' properties of the serial structure robot manipulator, such as: the fifth class kinematics pair (joint), the type of joint (revolute and prismatic), arbitrary axis and link orientation in the absolute coordinate system represented by a unit axis vector and a link vector respectively. An orthogonal transformation is used to convert vectors using a rotation matrix around an arbitrary axis. The basis of the method is the accurate and optimal determination of each iterative step value for each degree of mobility, which leads the final link (grip) maximum approximation to the specified parameters. The method called the “finite rotation and displacement method” (FRDM) has been developed by using the theorems which together have the properties of consistency, independence, and completeness. The methodology and the algorithm for solving IKs have been developed too. According to the FRDM method algorithm, there was developed the IK solution software, which consists of the algorithm's common part modules in the form of a dynamically linked library and individual part for a particular manipulator in the form of source data. The source data consists of the manipulator's vector model, the values of the structure's constraints of the generalized coordinates and signs that display the properties of kinematic pairs by type and by class. Depending on the type of singular points the passing through them is provided by a small change in the manipulator's configuration or by setting generalized coordinates that provide predictable movement of

the manipulator's links in the vicinity of the singular points. The method has no problems with convergence and can be used for robot manipulators with many degrees of mobility which controlled in real-time mode.

**Keywords:** manipulator, kinematic pairs, joints, inverse kinematics, finite rotation angle, finite displacement.

## Введение

Современное управление манипуляторами при проведении различных технологических операций осуществляется оператором при непосредственном управлении конечным звеном с помощью джойстика в режиме «онлайн»<sup>2</sup>. При таком управлении для системы управления фундаментальной задачей является определение желаемых значений обобщенных координат звеньев манипулятора.

Фирма «Океанос» формирует модульный подход в проектировании манипулятора, основанный на разработке универсального звена. Формирование манипулятора предполагает произвольное внешнецеховое соединение этих звеньев согласно требованию заказчика. При этом, чтобы управлять манипулятором, возникает потребность разрабатывать для каждого произвольно собранного манипулятора решение ОЗК, что сопряжено с определенными трудностями и последующей отладкой ПО. В этом случае может быть полезным применение метода МКПС, основанного на описании движения одного звена с кинематической парой в виде шарнира или призмы, использующего общий подход в решении ОЗК для манипуляторов с последовательно соединенными звеньями. Для конкретного манипулятора используются исходные данные и необходимая настройка метода на прохождение сингулярных точек для этого манипулятора. Последнее особенно важно для манипуляторов при организации автоматического управления конечным звеном манипулятора в режиме «оффлайн»<sup>3</sup>.

Из всех популярных на сегодняшний день методов, а именно: FABRIK, CCD, J.Transpose, J. DLS, J. SVD-DLS, FTL, Триангуляция, метод МКПС не уступает эвристическому самому быстрому методу FABRIK и имеет более естественную настройку для конкретного МР [1, 2].

## 1. Постановка проблемы

Проектирование и производство манипуляторов на основе модульного подхода позволяет существенно снизить затраты на изготовление манипуляторов, а простая вне цеховых условий сборки позволяет получить на выходе манипуляторы по совокупности удовлетворяющие максимальному числу требований для различных применений. Такой подход позволяет осуществить более быстрый темп роботизации любой отрасли промышленности с одной стороны.

С другой стороны, в связи с ростом объемов выпуска манипуляторов по указанной схеме

появляется высокая потребность в решении ОЗК для организации современного управления манипуляторами с произвольной кинематической схемой.

Метод МКПС может успешно применяться в решении ОЗК для указанных манипуляторов, имея отлаженное ПО для манипуляторов с произвольным числом звеньев. Для конкретного манипулятора требуется ввести исходные данные в виде векторной модели и настроить решение на прохождение сингулярных точек этого манипулятора.

## 2. Основа метода МКПС

Метод МКПС основан на следующих элементах:

- звено с кинематической парой в виде шарнира или призмы,
- векторная модель манипулятора, состоящая из единичных векторов кинематических пар и векторов звеньев, равных их длинам,
- вспомогательные векторы, определяющие положение произвольного звена манипулятора относительно текущего и нового положений схвата манипулятора,
- теоремы определения точных и оптимальных итерационных шагов для выполнения условия максимального приближения схвата к заданным параметрам по каждой степени подвижности манипулятора представлены в [3],
- теорема о совместной сходимости при последовательном поиске решения ОЗК по параметрам положения и ориентации приведена ниже,
- параметры настройки метода для предсказуемого прохождения манипулятора в окрестности сингулярных точек и для движения схвата манипулятора в окрестности границы рабочей зоны.

### Теорема о совместной сходимости.

Совместная сходимость последовательностей  $R$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  существует всегда, если выполняются следующие условия:

- последовательности  $R$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  каждая в отдельности являются монотонно убывающими и ограниченными снизу,
- заданные параметры положения и ориентации схвата находятся в рабочей зоне манипулятора. Где  $R$  – параметр приближения схвата по положению,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – параметры приближения схвата по ориентации (см. [3, 4]).

**Доказательство.** Пусть решение ОЗК ищется последовательно по каждому параметру  $R$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  согласно структурной схеме, представленной на рисунке 1.

<sup>1</sup>) Проприетарный софт – программное обеспечение, являющееся частной собственностью автора метода.

<sup>2</sup>) «онлайн» – работа в режиме дистанционного управления оператором.

<sup>3</sup>) «оффлайн» – режим автоматической работы с использованием систем технического зрения и распознавания.

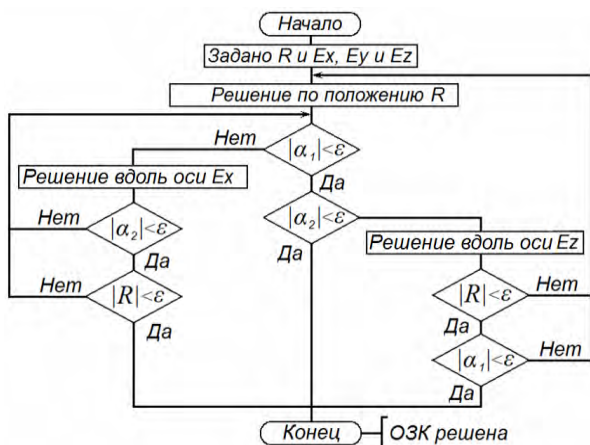


Рис. 1. Структурная схема

Выполнение последовательно условий  $R_{k1} < \epsilon_{зад}$ ,  $\alpha_{1k2} < \epsilon_{зад}$  и  $\alpha_{2k3} < \epsilon_{зад}$ , где  $k1, k2$  и  $k3$  – число итераций для достижения решения по каждому параметру будем называть решением по каждому параметру или макроитерацией. Так как для решения ОЗК по каждому параметру  $R$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  используются одни и те же звенья манипулятора, то решение по одному параметру «портит» решение по другим параметрам. Максимальные начальные члены последовательностей удовлетворяют

$$условиям \quad R_0 \leq \sum_{i=1}^n L_i, \quad \alpha_{10} \leq 180^\circ \text{ и } \alpha_{20} \leq 180^\circ, \text{ где } L_i -$$

длина  $i$ -го звена манипулятора. Поэтому последовательности  $R$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  также ограничены сверху. При выполнении условий теоремы о совместной сходимости, движение конечного звена согласно теоремам в [3] уменьшает верхние ограничения последовательностей  $R$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , а значит в меньшей степени «портит» достигнутые ранее решения. Отсюда следует вывод, что последовательности, составленные из верхних ограничений по каждой последовательности  $R$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , являются также монотонно убывающими и ограниченными снизу, так как каждая из них ограничена снизу. По теореме 3.15 в [5] это соответствует сходимости построенной таким образом последовательности, что и является доказательством теоремы о совместной сходимости.

### 3. Объект для исследования решения ОЗК

Шестистепенной манипулятор «УПМУ» представляет собой манипулятор последовательной структуры с кинематическими парами пятого класса в виде шарниров. Кинематическая схема манипулятора и его фотография в составе изделия показаны на рисунках 2 и 3.

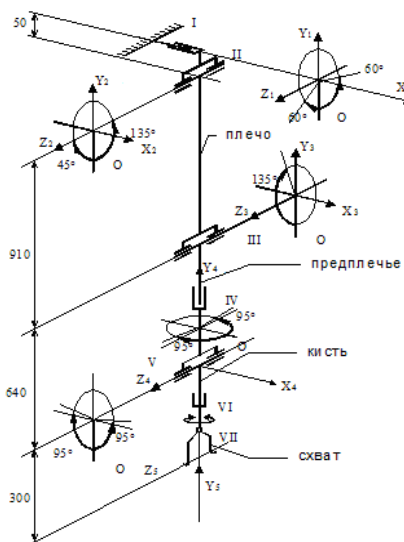


Рис. 2. Кинематическая схема манипулятора «УПМУ»



Рис. 3. Фотография манипулятора «УПМУ»

Для применения метода МКПС в решении ОЗК применительно к манипулятору «УПМУ» необходимо построить векторную модель. Для этого в прямоугольной декартовой системе координат  $x_0y_0z_0$  нулевого звена построим с помощью векторов манипулятор, кинематическая схема которого показана на рисунке 2. Для определения звеньев манипулятора введем векторы  $\vec{M}_i$ , направленные вдоль каждого звена и равные по модулю длинам звеньев. Для определения ориентации осей кинематических пар введем единичные векторы  $\vec{e}_i$ , направленные вдоль осей шарниров кинематических пар.  $N$  – характерная точка схвата,  $\vec{M}_6$  и  $\vec{M}_z$  – векторы, указывающие текущую ориентацию схвата,  $\vec{E}_x$  и  $\vec{E}_z$  – векторы, указывающие заданную ориентацию схвата. Построенная таким образом векторная модель манипулятора «УПМУ» показана на рисунке 4. Нижний индекс  $i=1, \dots, n$ , где  $n=6$  – число звеньев манипулятора.

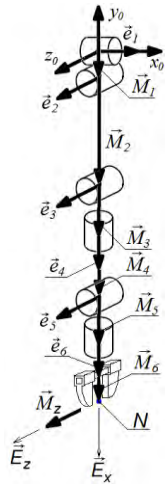


Рис. 4. Векторная модель манипулятора «УГМУ»

Исходные данные для векторной модели манипулятора, изображенной на рисунке 4, следующие:  $e_1(1,0,0)$ ;  $e_2(0,0,1)$ ;  $e_3(0,0,1)$ ;  $e_4(0,-1,0)$ ;  $e_5(0,0,1)$ ;  $e_6(0,-1,0)$ ;  $M_1(0,-0,005,0)$ ;  $M_2(0,-0,91,0)$ ;  $M_3(0,-0,44,0)$ ;  $M_4(0,-0,2,0)$ ;  $M_5(0,-0,1,0)$ ;  $M_6(0,-0,1,0)$ ;  $M_z(0,0,1)$ .

Начальные значения обобщенных координат:  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = \theta_5 = \theta_6 = 0$ .

3.1. Результаты решения ОЗК

Графики обобщенных координат  $\theta_1, \dots, \theta_6$  при движении манипулятора в процессе решения ОЗК показаны на рисунке 5. Начальное и заданное положение схвата представлены однородными матрицами (1) и (2) соответственно.

Однородная матрица начального положения и ориентации конечного звена манипулятора

Начальные углы Эйлера-Крылова:  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\psi = -90^\circ$ ,  $\theta = 0^\circ$ , что соответствует углам курса, дифферента и крена ориентации конечного звена манипулятора в начальном положении. Начальные координаты характерной точки конечного звена манипулятора  $[0, 0 \text{ м}, -1,9 \text{ м}, 0, 0 \text{ м}]$ .

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1,9 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Однородная матрица заданного положения и ориентации конечного звена манипулятора

Заданные углы Эйлера-Крылова:  $\varphi = 30^\circ$ ,  $\psi = 20^\circ$ ,  $\theta = 50^\circ$ , что соответствует углам курса, дифферента и крена ориентации конечного звена манипулятора в заданном положении. Заданные координаты характерной точки конечного звена манипулятора  $[1,2 \text{ м}, 0,5 \text{ м}, 0,3 \text{ м}]$ .

$$\begin{pmatrix} 0,813798 & 0,19263 & 0,548295 & 1,2 \\ 0,34202 & 0,604023 & -0,719846 & 0,5 \\ -0,469846 & 0,773337 & 0,425669 & 0,3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Однородная матрица положения и ориентации конечного звена манипулятора после решения ОЗК

Полученные углы Эйлера-Крылова:  $\varphi = 30,027^\circ$ ,  $\psi = 20,018^\circ$ ,  $\theta = 49,062^\circ$ , что соответствует углам

курса, дифферента и крена ориентации конечного звена манипулятора после решения ОЗК.

$$\begin{pmatrix} 0,813483 & 0,183822 & 0,551774 & 1,20072 \\ 0,342315 & 0,615656 & -0,709781 & 0,49964 \\ -0,470176 & 0,766275 & 0,4379 & 0,29941 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Значения обобщенных координат после решения ОЗК:  $\theta_1=229,34^\circ$ ;  $\theta_2=25,95^\circ$ ;  $\theta_3=91,32^\circ$ ;  $\theta_4=-113,87^\circ$ ;  $\theta_5=38,56^\circ$ ;  $\theta_6=63,34^\circ$ .

Результаты решения задачи ОЗК приведены в однородной матрице положения (3) и на рисунке 5.

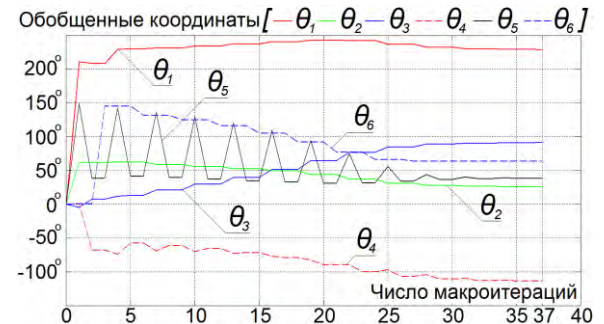


Рис. 5. Графики обобщенных координат звеньев манипулятора «УГМУ»

3.2. Результаты работы метода

Сравнивая заданную матрицу положения (2) с матрицей (3), полученной после решения ОЗК, можно убедиться в высокой точности полученного результата. Таким образом, для решения ОЗК потребовалось 37 макроитераций для шестистепенного манипулятора, показанного на рисунке 3. Время решения ОЗК равно 17 мс. Данная оценка времени решения ОЗК проводилась на микроконтроллере STM32F407VGT6 при тактовой частоте ядра ARM Cortex-M4F равной 144 МГц. ОЗК решалась для заданной точности  $\epsilon_{зад} = 0,001$  по каждому параметру, что соответствует 1 мм по положению и 3,44 минуты по ориентации.

4. Программно-аппаратный комплекс

Для получения и анализа результатов решения ОЗК разработан и используется программно-аппаратный комплекс (ПАК). Здесь показана экспериментальная часть ПАК для более точного определения времени решения ОЗК, использующая микроконтроллер. Экспериментальная установка собрана следующим образом: к ноутбуку под управлением ОС Microsoft Windows 7 Ultimate SP1 по Ethernet подключена сборка из двух плат: STM32F407G-DISC1 (макетная плата для оценки возможности микроконтроллера) и STM32F4DIS-BB (плата расширения для макетной платы). На плате STM32F407G-DISC1 стоит микроконтроллер STM32F407VGT6 с ядром ARM Cortex-M4F, работающий в данной установке на частоте 144 МГц. Через USB-порт к ноутбуку подключена шестистепенная рукоятка 3D Connexion Space Navigator, с которой идёт задающее воздействие в виде скоростей изменения положения и ориентации схвата манипулятора. Данная сборка показана на рисунке 6.



Рис. 6. Сборка из двух плат и рукоятка 3D Connexion Space Navigator

На ноутбуке запущена программа, которая выполняет следующие функции:

- визуализация манипулятора на экране компьютера,
- получение через оперативную память задающих сигналов от рукоятки,
- обмен по Ethernet с микроконтроллером для осуществления режима управления манипулятором по вектору скорости схвата,
- отображение отладочных данных с микроконтроллера и с ноутбука на экране.

Для измерения времени решения ОЗК в программе на микроконтроллере используется шестнадцатизначный таймер TIM2, тактируемый системной частотой деленной на два, т.е. 72 МГц. Программа на микроконтроллере работает в режиме ожидания команд по Ethernet. Приходит 3 вида команд: 1) SetQ, 2) FKCompute и 3) IKCompute. Для того чтобы измерить искомое время решения ОЗК, необходимо послать только две команды: SetQ и IKCompute и посмотреть результат измерения времени решения ОЗК и число итераций. Каждая

команда шлётся циклически с частотой 10 Гц, пока на неё не придёт ответ. Время решения ОЗК измеряется по формуле 
$$\Delta\tau_{\text{ОЗК}} = \frac{(2^{16} - \Delta\tau_{\text{пр}}) \cdot k + n + 1}{72 \cdot 10^6}$$

, где  $k$  – число сбросов по переполнению таймера,  $n$  – значение счетного регистра таймера,  $\Delta\tau_{\text{пр}}$  – время обработки одного прерывания. Время  $\Delta\tau_{\text{ОЗК}}$  определяется с допущением  $\Delta\tau_{\text{пр}} = 0$ .

### Заключение

В работе рассмотрен новый подход к решению ОЗК для манипуляторов последовательной структуры с произвольным числом звеньев, связанных кинематическими парами пятого класса. На этой основе разработан метод «конечного поворота и смещения» (МКПС). Показано применение метода МКПС для решения ОЗК при управлении конечным звеном манипулятора последовательной структуры с шестью звеньями, связанными кинематическими парами пятого класса.

По алгоритму метода разработано программное обеспечение решения ОЗК, структура которого формируется из модулей общей части алгоритма в виде динамически подключаемой библиотеки, содержащей все необходимые подпрограммы для организации решения ОЗК, и индивидуальной для конкретного манипулятора в виде исходных данных.

Исходными данными для метода являются векторная модель манипулятора, значения конструктивных ограничений обобщенных координат и признаки, отображающие свойства кинематических пар по виду и по классу. В методе предусмотрена настройка решения на обход сингулярных точек манипулятора.

### Литература

1. Aristidou, A. A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem / Andreas Aristidou, Joan Lasenby Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge CB2 1PZ, UK FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem Andreas Aristidou, Joan Lasenby Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge CB2 1PZ, UK Великобритания <http://www.andreasaristidou.com/publications/papers/FABRIK.pdf>
2. Aristidou, A. Inverse Kinematics: a review of existing techniques and introduction of a new fast iterative solver / A. Aristidou, J. Lasenby. CUED/F-INFENG/TR-632 September 20, 2009 Cambridge University Engineering Department (Андреас Аристиду и Джоан Ласенби, Кембриджский университет) <http://www.andreasaristidou.com/publications/papers/CUEDF-INFENG,%20TR-632.pdf>
3. Данилов, А. В. Общий подход к решению обратной задачи кинематики для манипулятора последовательной структуры с помощью конечного поворота и смещения [Электронный ресурс] / А. В. Данилов, А. Н. Кропотов, О. В. Трифонов // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2018. – № 81. – Режим доступа: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-81>
4. Данилов, А. В. Применение метода конечного поворота и смещения для манипулятора последовательной структуры с кинематическими парами пятого класса [Электронный ресурс]
5. А. В. Данилов, А. Н. Кропотов, О. В. Трифонов Препринты ИПМ им. Келдыша. – 2018. – № 107. – Режим доступа: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-107>
6. Ильин, В.А. Основы математического анализа Часть I / В.А. Ильин, Э.Г. Позняк // Изд. «НАУКА» Москва 1971 г. 600 с.

### References

1. Aristidou, A. A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem / Andreas Aristidou, Joan Lasenby Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge CB2 1PZ, UK FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem Andreas Aristidou, Joan Lasenby Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge CB2 1PZ, UK Великобритания <http://www.andreasaristidou.com/publications/papers/FABRIK.pdf>

2. Aristidou, A. Inverse Kinematics: a review of existing techniques and introduction of a new fast iterative solver / A. Aristidou, J. Lasenby. CUED/F-INFENG/TR-632 September 20, 2009 Cambridge University Engineering Department <http://www.andreasaristidou.com/publications/papers/CUEDF-INFENG,%20TR-632.pdf>
3. Danilov, A. V. Obshchiy podkhod k resheniyu obratnoy zadachi kinematiki dlya manipulyatora posledovatel'noy struktury s pomoshch'yu konechnogo povorota i smeshcheniya [Elektronnyy resurs] A. V. Danilov, A. N. Kropotov, O. V. Trifonov Preprinty IPM im. M. V. Keldysha. – 2018. – № 81. – Rezhim dostupa: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-81>
4. Danilov, A. V. Primenenie metoda konechnogo povorota i smeshcheniya dlya manipulyatora posledovatel'noy struktury s kinematicheskimi parami pyatogo klassa [Elektronnyy resurs]
5. V. Danilov, A. N. Kropotov, O. V. Trifonov Preprinty IPM im. Keldysha. – 2018. – № 107. – Rezhim dostupa: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-107>
6. Il'in, V.A. Osnovy matematicheskogo analiza Chast' I V.A. Il'in, E.G. Poznyak Izd. «NAUKA» Moskva 1971 g. 600 s.



УДК 656.615

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧАХ МОРСКИХ ПОРТОВ

Юлий Васильевич Горгуца

кандидат технических наук, Генеральный директор ООО «ЮгМорСтрой – Т»  
353920, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Дзержинского 183  
E mail yugor@inbox.ru

### Аннотация

Рассматривается актуальная проблема проектирования и эксплуатации морских портов – проблема принятия решений. Для получения эффективных решений с наибольшей полезностью, необходимо рассмотреть все возможные варианты, всё множество возможных условий реализации решения и учесть все факторы неопределённости и риска. Для этого предлагается использовать аппарат системного анализа. До настоящего времени в эксплуатационной науке морского транспорта этот материал не использовался. Описываются элементы системного анализа – матрицы решений, оценочные функции и математические критерии. Описано возникновение реальных проблем принятия решений на двух перегрузочных комплексах (ПК) порта Новороссийск – универсального и зерноперегрузочного. Описаны возможные состояния с точки зрения надёжности эксплуатации, в которых находились ПК, и предлагаемые решения, из которых надо было выбрать наиболее эффективное. Полезность решения определялась с помощью минимаксного критерия, критерия Байеса – Лапласа и критерия Гермейера. Полученные решения были рассмотрены эксплуатационниками, получили их положительную оценку и были реализованы. Прошедший период эксплуатации подтвердил их эффективность.

**Ключевые слова.** Морские порты, эффективное решение, риск, системный анализ, матрица, оценочные функции, математические критерии.

## PRACTICAL USE MATHEMATICAL CRITERIA OF DECISION-MAKING IN SEA PORTS PROBLEMS

Yuliy V. Gorgutsa

PhD (Eng), CEO of “YugMorStroy-T” LLC  
Dzerzhinsky pr., 183, Novorossiysk, 353920, Krasnodarskiy Kray, Russian Federation  
E-mail: yugor@inbox.ru

### Abstract

The work presented describes the pressing problem of sea ports design and operation - problem of decision-making. It is necessary to consider all possible options, whole multitude of possible conditions of decision implementation and consider any uncertainty to acquire effective solutions with maximum usefulness. The work suggests using the method of systemic analysis. This method hasn't been used in sea transport operational science to date. Key elements of system analysis are described: matrix of decisions, evaluation functions and mathematical criteria. The emergence of real problems of decision making is described with examples of two Dry Cargo Handling Terminals (DCHT) in Novorossiysk sea port - universal and grain loading. The work describes possible states of DCHT considering exploitation reliability and possible solutions, of which only the most effective one had to be used. Usefulness of decisions was defined by minimax criterion, criterion of Bayes - Laplace and Germeyer's criterion. Acquired decisions examined by operating managers, got their positive assessment and were implemented. The intervening period of operation has confirmed their efficiency.

**Key words:** sea ports, effective solution, risk, system analysis, matrix algebra, evaluation functions, mathematical criteria.

### Введение

Для нахождения эффективных решений, как в области проектирования, так и эксплуатации морского порта – сложного технического комплекса, функционирующего под воздействием большого числа уникальных природных факторов, необходимо рассмотреть всё множество возможных решений и условий их реализации с учётом неопределённости и рисков. Для этого необходимо привлечь аппарат системного анализа. Данная работа описывает применение элементов системного анализа матрицы решений, оценочных функций и математических критериев для решения задач морских портов.

Теоретическую базу составляют работы отечественных [1, 2, 3] и зарубежных [4] ученых. Детально описываются два случая нахождения решений с максимальной полезностью для двух перегрузочных комплексов в Новороссийском морском порту.

### 1. Матрица решений

Математически принятие решений представляет собой выбор одного из некоторого множества рассматриваемых вариантов:  $E_1, E_2, \dots, E_i, \dots$ . Каждый вариант определяется каким-то результатом, который может быть количественно оценен. Для простоты оценка и результат отождествляются и обозначаются одним

символом  $e_i$ . Оценки могут характеризовать такие величины, как минимум затрат на строительство и капитальный ремонт объекта и его эксплуатационные расходы, наибольшую рентабельность или прибыль, наименьший срок возмещения затрат или максимальный коэффициент окупаемости капиталовложений и т. д. Цель - найти вариант с наибольшим значением результата, т.е.  $\max e_i$ . В случае необходимости получения минимальной величины, решение будет точно таким же, но будут рассматриваться отрицательные величины полезности.

Формально этот процесс описывается формулой

$$E_0 = \{E_{i_0} \mid E_{i_0} \subset E_{i_0} \wedge e_{i_0} = \max e_i\} \quad (1.1)$$

То есть множество  $E_0$  оптимальных вариантов состоит из тех вариантов  $E_{i_0}$ , которые принадлежат множеству  $E$  всех вариантов и оценка  $e_{i_0}$  которых максимальна среди всех оценок  $e_i$ ,

В реальном процессе проектирования и эксплуатации морских портов каждому варианту решения  $E_i$  будут соответствовать различные внешние условия (состояния)  $F_j$  и результаты  $e_{ij}$  решений.

Семейство решений описывается некоторой матрицей (табл. 1).

Таблица 1

<b>F</b>	<b>F<sub>1</sub></b>	<b>F<sub>2</sub></b>	...	<b>F<sub>j</sub></b>	...	<b>F<sub>n</sub></b>
<b>E</b>						
<b>E<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>11</sub></b>	<b>e<sub>12</sub></b>	...	<b>e<sub>1j</sub></b>	...	<b>e<sub>1n</sub></b>
<b>E<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>21</sub></b>	<b>e<sub>22</sub></b>	...	<b>e<sub>2j</sub></b>	...	<b>e<sub>2n</sub></b>
...	...	...	...	...	...	...
<b>E<sub>i</sub></b>	<b>e<sub>i1</sub></b>	<b>e<sub>i2</sub></b>	...	<b>e<sub>ij</sub></b>	...	<b>e<sub>in</sub></b>
...	...	...	...	...	...	...
<b>E<sub>m</sub></b>	<b>e<sub>m1</sub></b>	<b>e<sub>m2</sub></b>	...	<b>e<sub>mj</sub></b>	...	<b>e<sub>mn</sub></b>

## 2. Оценочные функции

В любом решении заложена определённая степень риска, поэтому нельзя ограничиться только выбором варианта с максимальным  $e_{ij}$ , обычно этому решению сопутствует и наибольший риск, значит надо, определить стратегию риска и уже потом выбрать соответствующий вариант. Первоначальная задача максимизации  $\max e_i$  согласно критерию (1.1) должна быть заменена другой, учитывающей все последствия любого из вариантов решения  $E_i$ . Именно эту задачу выбора решения с наибольшей полезностью и с учётом риска его осуществления помогают решить оценочные функции.

При вводе оценочных функций матрица решений сводится к одному столбцу. Каждому варианту  $E_i$  приписывается некоторый результат  $e_{ir}$ , характеризующий, в целом, все последствия этого решения. – табл. 2

Таблица 2

<b>E<sub>1</sub></b>	<b>E<sub>1r</sub></b>
<b>E<sub>2</sub></b>	<b>E<sub>2r</sub></b>
...	...
<b>E<sub>i</sub></b>	<b>e<sub>ir</sub></b>
...	...
<b>E<sub>m</sub></b>	<b>e<sub>mr</sub></b>

В задачах морских портов в основном имеется чисто экономическая ответственность, поэтому риск можно определить, как произведение суммы ущерба от какого-то события на вероятность его наступления.

Основные позиции, выбираемые оператором, следующие.

Оптимистическая позиция:

$$\max e_{ir} = \max(\max e_{ij}) \quad (2.1)$$

Из матрицы результатов решений  $e_{ij}$  (табл.1) выбирается вариант (строка), содержащий наибольший из всех возможных результатов, т.е. делается ставка на то, что выпадет наивыгоднейший случай.

Позиция нейтралитета:

$$\max e_{ir} = \max\left(\frac{1}{n} \sum^n e_{ij}\right) \quad (2.2)$$

Выбирается вариант (строка) с максимальным средним значением результатов..

Пессимистическая позиция:

$$\max e_{ir} = \max(\min e_{ij}) \quad (2.3)$$

Каждый вариант представляется наихудшим из возможных результатов. Затем выбирается самый выгодный вариант, т.е. ожидается наилучший результат в наихудшем случае.

Позиция относительного пессимизма:

$$\min e_{ir} = \min \max(\max e_{ij} - e_{ij}) \quad (2.4)$$

Для каждого варианта решения оцениваются потери в результате по сравнению с его наилучшим результатом, а затем из наихудших результатов выбирается наилучший.

Позиция компромисса:

$$\max e_{ir} = \max(\min e_{ij} + \max e_{ij}). \quad (2.5)$$

Последствия каждого из решений характеризуются комбинацией из его наибольшего и наименьшего результатов.

## 3. Математические критерии принятия решений

Математические критерии, используя оценочные функции и их модификации, решают ту же задачу нахождения решения с наибольшей полезностью, взвешивая риски, но помогают уйти от несколько «литературных» терминов: оптимистическая, пессимистическая позиция к чётким математическим формулам. При нахождении результатов по нескольким критериям, используются несколько стратегий, и проблема рассматривается с различных точек зрения.. В монографии автора (6) были описаны классические и производные критерии принятия решения, их специфика и предпочтительность для различных задач морских портов. В данной статье представлены только те критерии, которые были конкретно апробированы автором при получении практических решений по Новороссийскому порту, описанных в разделе 4.

### 3.1. Минимаксный критерий (ММ)

При задачах таких капиталоемких объектов, как морские порты всегда стремятся уменьшить риск потери времени и средств. При таком подходе наиболее предпочтительно применение минимаксного критерия(ММ), который использует

оценочную функцию, соответствующую позиции крайней осторожности.

$$\text{При } Z_{mm} = \max e_{ir} \quad (3.1.1)$$

$$e_{ir} = \min e_{ij} \quad (3.1.2)$$

$$E_o = \{ E_{io} \mid E_{io} \in E \text{ и } e_{io} = \max \min e_{ij} \} \quad (3.1.3)$$

где  $Z_{mm}$  - оценочная функция ММ - критерия.

Правило выбора решения следующее.

- матрица решений  $\{e_{ij}\}$  дополняется столбцом из наименьших результатов  $e_{ir}$  каждой строки, выбирается вариант  $E_{io}$ , в строке которого стоят наибольшие значения  $e_{ir}$  этого столбца;

- выбранный таким образом вариант практически полностью исключают риск, какие бы условия  $F_j$  ни встретились, результат не может оказаться ниже  $Z_{mm}$ .

Применяется ММ-критерий, если ситуация принятия решения, характеризуется следующими обстоятельствами:

- о вероятностях появления состояний  $F_j$  ничего не известно; и надо считаться с появлением любого из состояний  $F_j$ ;

- решение реализуется лишь один раз;

- не допускается получать результат, меньший чем  $Z_{mm}$ .

Естественно, что эти условия характерны для многих задач морских портов.

### 3.2. Критерий Байеса-Лапласа (BL)

Этот критерий учитывает каждый из возможных результатов по вариантам и вероятности их реализации.

Пусть  $q_j$  - вероятность появления внешнего состояния  $F_j$ ; тогда для BL-критерия

$$z_{BL} = \max e_{ir} \quad (3.2.1)$$

$$e_{ir} = \sum e_{ij} q_j \quad (3.2.2)$$

$$E_o = \{ E_{io} \mid E_{io} \in E \text{ и } e_{io} = \max \sum e_{ij} q_j \mid \sum q_j = 1 \} \quad (3.2.3)$$

Правило выбора следующее:

- матрица решений дополняется еще одним столбцом, содержащим математическое ожидание значений каждой из строк. Выбираются те варианты  $E_{io}$ , в строках которых стоит наибольшее значение  $e_{ir}$  этого столбца.

предполагается, что ситуация, в которой принимается решение, характеризуется следующими обстоятельствами:

- вероятности появления состояний  $F_j$  известны и не зависят от времени;

- решение реализуется (теоретически) бесконечно много раз;

- для малого числа реализаций решения допускается некоторый риск.

Исходная позиция применяющего BL-критерий оптимистичнее, чем в случае ММ-критерия, однако она предполагает более высокий уровень информированности.

### 3.3. Критерий Гермейера (G)

Этот критерий, обладает определенной эластичностью за счёт присвоения каждому состоянию своей вероятности. Ориентирован на величины потерь, т.е. на отрицательные значения всех  $e_{ij}$ . При задачах морских портов почти всегда приходится иметь дело с капиталовложениями, ценами и затратами, поэтому условие  $e_{ij} < 0$  выполняется достаточно часто..

Итак,

$$Z_G = \max e_{ir} \quad (3.3.1)$$

$$e_{ir} = \min e_{ij} q_j \quad (3.3.2)$$

$$E_o = \{ E_{io} \mid E_{io} \in E \text{ и } e_{io} = \max \min e_{ij} q_j \mid e_{ij} < 0 \} \quad (3.3.3)$$

Правило выбора согласно G-критерию формулируется так:

Матрица решений  $\{e_{ij}\}$  дополняется еще одним столбцом, содержащим в каждой строке наименьшее произведение имеющегося в ней результата на вероятность соответствующего состояния  $F_j$ . Выбираются те варианты  $E_{io}$  в строках которых находится наибольшее значение  $e_{ir}$  этого столбца.

Условия применимости таковы:

- вероятности появления состояний  $F_j$  известны;

- допускается некоторый риск;

- решение может реализоваться один или много раз.

Если функция распределения известна не очень надежно, а число реализаций мало, то, G-критерий может приводить к большому риску, поэтому его используют вкуче с другими критериями.

## 4. Практическое применение

**Первым объектом внедрения** был причал № 18, построенный в 1961 году для универсального грузоперевалочного комплекса Новороссийского морского порта. Причал расположен напротив входа в порт. Реконструкции или капитального ремонта не проводилось. Длина причала – 182.5 м, проектная глубина – 11.5 м. Основная часть конструкции представляет собой эстакаду на ж.б. сваях – оболочках диаметром 1.6 м с подпричальным откосом, верхним строением (ростверком) из сборных преднапряженных ригелей, плит пролетного строения, бортовых балок, омоноличенных между собой и сваями – оболочками. Тыловое сопряжение эстакады с телом пирса представляет собой вертикальную стенку из сборных ж/б коробов с передней волногасящей гранью из решетчатых плит, заполненных крупным камнем, за коробом отсыпана каменная призма с контрфильтром.

Уже в 1996 году первичным освидетельствованием причала, проведенным Союзморниипроект, был выявлен ряд значительных дефектов и разрушений, среди которых особенно опасным было разрушение защитного слоя бетона с обнажением и коррозией арматуры несущих элементов конструкций: ригелей, плит пролетного строения и бортовых балок. В целом техническое состояние причала № 18 было оценено как ограничено работоспособное. До выполнения ремонтных работ было рекомендовано исключить перемещение транспорта и складирование груза на участке ростверка между тыловым крановым рельсом и границей тылового сопряжения..

В декабре 1999 года новое обследование констатировало дальнейшее ухудшения состояния конструкций причала. Необходимо было срочно произвести ремонт несущих конструкций элементов эстакады. До его выполнения надо было полностью вывести из эксплуатации участок причала от тылового подкранового пути до границы

тылового сопряжения. В связи с тем, что для ремонта несущих конструкций причала был необходим вывод его из эксплуатации, что привело бы к потере доходов порта, его эксплуатация в ограниченном режиме продолжалась.

В 2002 г по результатам инспекторской проверки, в связи с ещё более ухудшившимся состоянием причала, до его ремонта предписывалось проведение регулярных (1 раз в месяц) осмотров нижней поверхности плит с регистрацией результатов в журнале технического надзора.

В связи с тем, что положение становилось критическим, а согласия между службами главного инженера и эксплуатации достичь не удавалось автор предложил найти решение с помощью математических критериев по методике, описанной выше.

В данной ситуации необходимо было принимать одно из следующих решений:

E1 – детальное обследование и разработка проекта капитального ремонта.

E2 - статистическое испытание несущей способности плит перекрытия.

Таблица 3

	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	ММ-критерии		ВЛ-критерии	
				$e_{ir} = \min_j e_{ij}$	$\max_i e_{ir}$	$e_{ir} = \sum_j e_{ij} q_j$	$\max_i e_{ir}$
E <sub>1</sub>	-3.5	-73.5	-73.5	-73.5	-73.5	-50.1	-50.1
E <sub>2</sub>	-0.9	-70.9	-84.9	-84.9		-52.3	
E <sub>3</sub>	-0.1	-70.1	-84.1	-84.1		-51.4	

E3 – регулярные осмотры

Перегрузочный комплекс мог находиться в одном из следующих состояний:

F1 – имеется резерв несущей способности перекрытия,

F2 - требуется скорейший капитальный ремонт,

F3 – аварийное состояние, необходимо немедленно выводить причал из эксплуатации и начинать капитальный ремонт.

Были выполнены стоимостные расчёты для принятия решения по видам обследований:

- стоимость детального обследования и разработки проекта капремонта – 3500 тыс. руб.

- стоимость статического испытания несущей способности плит перекрытия – 900 тыс. руб.,

- стоимость проведения регулярных осмотров и периодической оценки повреждений – 65 тыс. руб.,

В зависимости от того, в каком состоянии мог находиться причал – с резервом несущей способности или нет, затраты определились следующим образом:

- стоимость планового капитального ремонта - 70 млн. руб.

- в случае аварийного выхода из строя причала и необходимости его срочного капитального ремонта затраты могли возрасти ориентировочно на 20%.

Оценка вариантов решений по ММ и ВЛ – критерию (табл. 3) показала необходимость детального обследования причала и разработки проекта его капремонта.

Для большей убедительности был проведен ещё один расчёт теперь уже по критерию Гермейера с приоритетом вероятности состояния F3, т.е. g<sub>1</sub> = g<sub>2</sub> = 0.3, и g<sub>3</sub> = 0.4 (табл. 4). Этот критерий также рекомендовал вариант E1.

Результаты работы были доложены на техническом совещании порта и получили положительную оценку. Было выполнено детальное обследование и проект капремонта и в плановом порядке, после изготовления всех конструкций, сам капитальный ремонт причала в минимальные сроки.

Вторым объектом внедрения был комплекс по перевалке зерна. Основной объём экспорта зерна в

Новороссийском морском порту осуществляется зерноперегрузочным комплексом Новороссийского комбината хлебопродуктов (НКХП) через причал № 22 порта.

При заключении договора с подрядной организацией на обследование и ремонт комплекса руководство комбината обратилось к автору с просьбой дать экспертное заключение по принятию решения – выполнять ли полное инженерно – техническое обследование комплекса или ограничиться освидетельствованием его основных конструктивов?

Таблица 4

E <sub>ir</sub> / F <sub>1</sub>	{e <sub>1i</sub> }			{e <sub>1i</sub> q <sub>i</sub> }			e <sub>ir</sub> =min e <sub>1i</sub> q <sub>i</sub>	max e <sub>ir</sub>
	-3.5	-73.5	-73.5	-1.05	-22.1	-29.4		
E <sub>1</sub>	-3.5	-73.5	-73.5	-1.05	-22.1	-29.4	-29.4	-29.4
E <sub>2</sub>	-0.9	-70.9	-84.9	-0.36	-28.4	-34.0	-34.0	
E <sub>3</sub>	-0.1	-70.1	-84.1	0.04	-28.0	-33.6	-33.6	

Исходные данные для принятия решения определились следующие:

- стоимость текущего или выборочного освидетельствования или обследования – 150 тыс. руб.

- стоимость полного инженерно – технического обследования – 275 тыс. руб.

- стоимость планового текущего ремонта по материалам обследований могли составить ориентировочно – 750 тыс. руб.- стоимость капитального ремонта - 1 млн. руб.

- в случае вынужденного внеочередного текущего ремонта затраты в связи с вынужденной остановкой перегрузочного комплекса, и задержкой

перевалки грузов могли возрасти на 20 %, в случае аварийного внеочередного текущего ремонта затраты могли возрасти на 30%.

- в случае обнаружения при текущем освидетельствовании аварийного состояния комплекса и необходимости его немедленного капитального ремонта затраты могли возрасти на 15%, в случае аварийного выхода комплекса в период эксплуатации затраты возрастут на 30%.

Возможные варианты решений определились следующими:

E1 – полное инженерно – техническое обследование комплекса.

E 2 - текущее обследование.

E 3 – отказ от обследования.

Перегрузочный комплекс мог находиться в одном из следующих состояний;

F1 - износа и повреждений нет, ремонт преждевременен,

F2 - требуется текущий ремонт,

F3 - требуется немедленный капитальный ремонт.

Оценка вариантов решений по ММ – критерию показала необходимость полного обследования комплекса. Собственно, исходя из позиции «крайней осторожности», это и следовало ожидать. ВЛ-критерий предлагал отказ от обследований, но это решение было слишком рискованным. тем более по определению для применения ВЛ-критерия решение должно реализовываться бесконечно много раз, а для малого числа реализаций им допускается некоторый риск, что для нашего единичного случая недопустимо. Проведя анализ ситуации выбора решений, автор отметил очень важное обстоятельство: при наличии эксплуатационных служб главного механика и главного энергетика на комбинате, силами которых ведется постоянный контроль за техническим состоянием объектов комплекса, даже аварийный выход его из строя не приведет к человеческим жертвам, то – есть объект несет чисто экономическую ответственность, а значит позиция крайней осторожности необязательна.

Кроме того, анализируя сроки работы комплекса, условия его эксплуатации, а также его внешнее состояние, можно априори было склониться, к тому что наиболее вероятно его состояние - F2, то – есть требуется текущий ремонт. Этот анализ позволил сделать выбор в пользу критерия Гермейера, причем для F1 и F3 весовой множитель принять равным  $g = 0/3$ , а для F2 -  $g = 0/4$ . Результаты расчетов представлены в табл. 5. На основании этого были выданы рекомендации о выполнении выборочного обследования. перегрузочного комплекса.

Данная экспертная проработка была доложена автором на техническом совещании при главном инженере НКХП, получила высокую оценку эксплуатационников и была принята к исполнению.

Таблица 5

E i	{eij}			{eij qj}			eir =min eij qj	max eir l
E 1	-300	-1025	-1275	-	-410	-	-410	
				68.75		382.5		
E 2	-150	-1050	-1300	-37.5	-420	-390	-420	-420
E 3	0	-975	-1300	0	-390	-390	-390	

### Заключение

1. Для получения эффективных решений на современном научном уровне в задачах морских портов необходимо привлечь аппарат системного анализа 2. Описана матрица решений, оценочные функции и математические критерии принятия решений

3.. Детально описанные два случая нахождения решений с максимальной полезностью для двух перегрузочных комплексов в Новороссийском морском порту показывают высокую практическую значимость данной методики.

### Литература

1. Беляев Л.С. Решение сложных оптимизационных задач в условиях неопределённости – Новосибирск: «Наука», 1978.
2. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. – М. Наука 1971
3. Моисеев Н. П. Математические задачи системного анализа. – М. Наука, 1981
4. Муушик З., Мюллер П. Методы принятия технических решений. - М.: Мир, 1990.
5. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. / М. Радио и связь. 1991
6. Горгуца Ю.В. Новые методы принятия решений при проектировании и эксплуатации морских портов. – М. МГУ, изд. МАКС Пресс. 2001 г.

### References

1. Belyaev L.S. Reshenie slozhnykh optimizatsionnykh zadach v usloviyakh neopredelennosti – Novosibirsk: «Nauka», 1978.
2. Germeyer Y.B. Vvedenie v teoriyu issledovaniya operatsiy. – M. Nauka 1971
3. Moiseev N. P. Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza. – M. Nauka, 1981
4. Muushik Z., Myuller P. Metody prinyatiya tekhnicheskikh resheniy. - M.: Mir, 1990.
5. Saati T., Kerns K. Analiticheskoe planirovanie. Organizatsiya sistem. / M. Radio i svyaz'. 1991
6. Gorgutsa Y.V. Noveye metody prinyatiya resheniy pri proektirovani i ekspluatatsii morskikh portov. Monografiya. – M. MGU, izd. MAK S Press. 2001 g.

УДК 656.615

## МЕТОД КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВАРИАНТОВ КОМПОНОВКИ МОРСКИХ ПОРТОВ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Юлий Васильевич Горгуца

кандидат технических наук. Генеральный директор ООО «ЮгМорСтрой – Т»  
353920, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Дзержинского 183  
E-mail yugor@inbox.ru

### Аннотация.

Описан метод оценки проектов морских портов с помощью анализа иерархий. Используется метод попарного сравнения при шкале оценок в баллах от 1 до 9. Оценки располагаются в виде обратносимметричной квадратной матрицы. Вектор приоритетов матрицы суждений является главным собственным вектором. Доказано, что каждый уровень иерархий может быть представлен произведением главного вектора матрицы приоритетов более низкого уровня на главный вектор матрицы приоритетов данного уровня. За критерий принимается отношение выгод проекта к его издержкам, определенное по всем вариантам. Наилучшим считается тот вариант, где этот критерий достигает максимума. Описана апробация методики при расчёте эффективности генсхем развития порта Туапсе, компоновочных решений Таманского нефтяного терминала и компоновочных решений ГТС ТПК по перевалке угля на мысе Токи в бухте Мучки Хабаровского края.

**Ключевые слова.** Морские порты, компоновочные решения, критерии эффективности, анализ иерархий, граф иерархий, категории факторов, алгебра матриц.

## METHOD OF COMPLEX EVALUATION OF COMPARATIVE EFFICIENCY OF LAYOUT OPTIONS OF SEA PORTS THROUGH HIERARCHY ANALYSIS. PRACTICAL USE

Yuliy V. Gorgutsa

PhD (Eng), CEO of "YugMorStroy-T" LLC  
Dzerzhinsky pr., 183, Novorossiysk, 353920, Krasnodarskiy Kray, Russian Federation  
E-mail yugor@inbox.ru

### Abstract

The work presented describes the method of sea ports projects evaluation through method of hierarchy analysis. Pairwise comparison method is used at a rating scale in points from 1 to 9. Evaluations are located in inverse symmetric square matrix. Priority vector of judgement matrix is its own main vector. It is proven, that each hierarchy level may be presented as multiplication of main priority matrix vector of lower level on main vector of priority matrix of current level. Benefit ratio to its costs is taken per as a criterion, defined in all variations. The option, where this criteria reaches maximum, is considered the best. It is described methodology approbation in performance calculation of general layouts of development of Tuapse port, layout solutions of Taman Oil Terminal and layout solutions of GTS TPK for coal transshipment on cape Tok in Muchky Bay in Habarovskiy Kray.

**Key words:** Sea ports, layout solutions, performance criterion, hierarchy analysis, hierarchy graph, categories of factors, matrix algebra.

### Введение

В руководстве по технологическому проектированию морских портов РД 31.3.01.01-93 [2] в справочном приложении были представлены Методические указания по оценке сравнительной экономической эффективности вариантов компоновки морского порта, но это была перепечатка из предыдущих норм советского периода, и основным критерием оценки вариантов предлагалось принять совокупный минимум приведённых затрат, что в нынешних условиях рыночной экономики неприемлемо. В последнем выпуске Норм технологического проектирования морских портов СП 350.1326000.2018 [3], отменяющем предыдущие РД, вопрос оценки вариантов компоновки морских портов вообще никак не освещён. Всё это говорит о насущной

необходимости разработки нового метода комплексной оценки компоновочных решений морских портов.

### 1. Описание методики

Автором разработан метод комплексной оценки сравнительной эффективности вариантов проектов морских портов с помощью анализа иерархий [4]. Этот метод позволяет от общей цели переходить к подцелям, далее к подцелям более низкого порядка и т.д., доходя до исходных. При оценках факторов одного уровня используется метод попарного сравнения при шкале оценок в баллах от 1 до 9. Так при сравнении элементов А и В оценки назначаются следующие:

А и В одинаковы важны, назначаем 1;  
А незначительно важнее, чем В - 3;  
А значительно важнее В - 5;

А явно важнее В, назначаем - 7;

А по своей значительности абсолютно превосходит В, назначаем - 9.

Оценки располагаем в виде обратносимметричной квадратной матрицы. При сравнении элемента с самим собой имеем равную значимость, поэтому главная диагональ матриц должна состоять из единиц. Числа 2, 4, 6, 8 используются для облегчения компромиссов между суждениями, слегка отличающимися от вышеперечисленных основных. Доказано, что вектор приоритетов матрицы суждений является главным собственным вектором. Его вычисление целесообразно вести путем деления элементов каждого столбца на сумму элементов этого столбца, затем сложением элементов каждой полученной строки и делением этой суммы на число элементов строки, то есть усреднением по нормализованным столбцам.

Естественно, что матрицы, составленные по экспертным оценкам, не могут быть полностью согласованными, приближение к согласованности, отражающей пропорциональность оценок, характеризуется индексом согласованности (ИС), вычисляемым по формуле:

$$I_s = (m_{ix} - n) \times (n - 1) \quad (1)$$

где  $\lambda_{max}$  - максимальное или главное собственное значение,  $n$  - число оцениваемых объектов в матрице.

$\lambda_{max}$  находится следующим образом: путем умножения матрицы сравнений справа на вычисленный вектор приоритетов получаем новый вектор; разделив первую компоненту этого вектора на первую компоненту вектора приоритетов, вторую компоненту этого вектора на вторую компоненту вектора приоритетов и т.д., определим еще один вектор; разделив сумму компонент этого вектора на число компонент, найдем  $\lambda_{max}$ . Отношение ИС к среднему случайному индексу ( $I_s$ ) для обратносимметричной матрицы того же порядка, сгенерированной случайным образом по шкале от 1 до 9, называется отношением согласованности (ОС). Значения ОС меньше или равное 0,10 считается приемлемым.

Другой важный вопрос - как элементы низшего уровня представляют более высокий уровень? Или как более высокий уровень определяется элементами более низкого уровня? Доказано, что каждый уровень иерархий ( $W_i$ ) может быть представлен произведением главного вектора матрицы приоритетов более низкого уровня (В) на главный вектор матрицы приоритетов данного уровня (W) по правилам алгебры матриц

$$W_i = F_{i-1} * V_i \quad (2)$$

За критерий эффективности при выборе варианта строительства или развития морского порта принимаем отношение выгод проекта к его издержкам, определенное по всем вариантам. Наилучшим будет тот вариант, где этот критерий достигает максимума.

Выгоды от реализации проектов разбиваем на категории трех видов факторов: экономические, социальные и экологические.

К экономическим относим следующие: выгоды грузовладельцев от сокращения времени и стоимости доставки грузов; выгоды морских транспортников от перевалки грузов и сокращения

стояночного времени судов в порту за счет применения прогрессивных технологий; выгоды от увеличения сбора налогов за счет роста производства; выгоды от сокращения расходов по содержанию безработных за счет повышения занятости; выгоды от строительных работ.

Социальные выгоды проекта, получаемые от его реализации, представим в виде трех факторов: обеспечение большей безопасности судоходства и производства складских и погрузо-разгрузочных работ в новом порту; улучшение профессиональной структуры персонала из-за повышения доли работающих с более высокой квалификацией и оплатой труда; повышение привлекательности труда, стабильности ситуации в коллективах портового сообщества и удовлетворенности своим статусом и положением.

Экологические факторы рассматриваются с точки зрения вклада в персональные выгоды жителей портового города: удобство размещения портовых сооружений; доступность пользования ими и портовыми плавсредствами; эстетика, влияющая на выбор варианта проекта.

Издержки от реализации проекта разбиваем на те же три вида факторов, что и выгоды. Экономические издержки проекта включают расходы трех видов: капитальные вложения по вариантам проекта; эксплуатационные расходы; дополнительные затраты смежников и клиентуры.

Социальные издержки представляют собой анализ настроений и затрат жителей города: влияние различных вариантов проекта на усиление напряженности в городском сообществе; передислокация людей для заполнения новых рабочих мест; учет возможного сокращения зон отдыха горожан в соответствии с выбранным вариантом размещения порта.

Экологические издержки отличаются от выгод тем, что они представляют возможный вред, причиняемый экосистеме различными альтернативами проекта: загрязнение акватории; повышение запыленности воздушного бассейна; возможные другие факторы, которые могут привести к разрушению экологии.

Графы иерархий для выгод и издержек трех вариантов строительства морского порта представлены на рис. 1

Любой новый инструментарий должен быть хорошо разъяснен вплоть до деталей. Для иллюстрации описанной методики были выполнены расчеты на условном примере для сравнения трех вариантов проекта морского порта по категориям и факторам, описанным выше. Так как в журнальной статье невозможно разместить весь расчёт, (37 таблиц) остановимся только на узловых точках. В табл.1 показано вычисление приоритетов для матрицы выгод (А) по главным категориям (В1, В2, В3). В столбцы 2-4 занесены

Таблица 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>A</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>Bi1:Sum</b>	<b>Bi2:Sum</b>	<b>Bi3:Sum</b>	<b>Sum5-7</b>	<b>Vector</b>
<b>B1</b>	1,00	4,00	8,00	0,73	0,73	0,73	2,18	0,73
<b>B2</b>	0,25	1,00	2,00	0,18	0,18	0,18	0,55	0,18
<b>B3</b>	0,13	0,50	1,00	0,09	0,09	0,09	0,27	0,09
	1,38	5,50	11,00	1,00	1,00	1,00	3,00	1,00

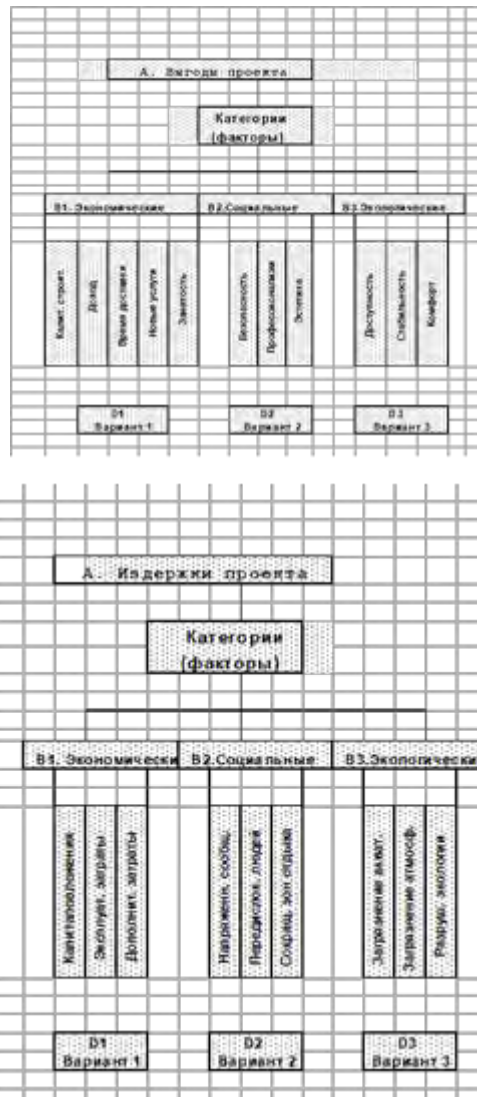


Рис. 1

попарные оценки, выполненные экспертами, (дробь для автоматизации расчетов представлены в десятичной форме). В соответствии с приближенным методом вычисления главного вектора, описанным выше, в столбцы 5-7 заносятся результаты от деления каждой оценки матрицы на их сумму по столбцам. В графе 8 суммируются результаты деления по строкам. В графе 9, построчно деля результаты графы 8 на сумму этого столбца, получаем компоненты главного вектора матрицы или оценки факторов. Эта же процедура используется для вычисления приоритетов факторов (C1-C5, C6-C8, C9-C11) в каждой категории (B1, B2, B3). Точно также выполняются расчёты для матриц издержек. Далее описанная процедура выполняется для оценки приоритета вариантов (D1, D2, D3) по каждому фактору - C1-C11 для выгод и C1-C9 для издержек.

В табл. 2 показано как по формуле 2 вычисляются приоритеты вариантов D1, D2, D3 по категориям выгод B1, B2, B3. Для этого в графы 2-4 напротив каждого фактора заносятся вычисленные оценки каждого варианта по этому вектору, а в графу 5 заносятся вычисленные факторы по каждой категории. В графах 6-8

представлены результаты умножения векторов  $B \cdot W$  по правилам алгебры матриц, суммы столбцов определяют вектор  $W$  - приоритеты вариантов по категориям выгод.

Таблица 2

1	2	3	4	5	6	7	8
B1	Vect D1	Vect D2	Vect D3	Vect B1	D1*B1	D2*B1	D3*B1
C1	0,57	0,38	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00
C2	0,35	0,58	0,06	0,09	0,03	0,05	0,01
C3	0,71	0,22	0,07	0,48	0,34	0,11	0,03
C4	0,47	0,47	0,07	0,17	0,08	0,08	0,01
C5	0,28	0,66	0,06	0,22	0,06	0,14	0,01
					0,54	0,40	0,06
B2	Vect D1	Vect D2	Vect D3	Vect B2	D1*B2	D2*B2	D3*B2
C6	0,69	0,24	0,07	0,71	0,49	0,17	0,05
C7	0,46	0,46	0,08	0,15	0,07	0,07	0,01
C8	0,65	0,10	0,25	0,14	0,09	0,01	0,04
					0,65	0,25	0,10
B3	Vect D1	Vect D2	Vect D3	Vect B3	D1*B3	D2*B3	D3*B3
C9	0,72	0,22	0,06	0,24	0,17	0,05	0,01
C10	0,65	0,29	0,07	0,70	0,45	0,20	0,05
C11	0,28	0,12	0,60	0,06	0,02	0,01	0,04
					0,64	0,26	0,10

В табл. 3 показано вычисление оценок выгоды вариантов в целом. В столбцы 2-4 напротив вариантов (D1, D2, D3) по табл. 2. В графу 5 заносятся приоритеты категорий из табл. 1. Перемножая вектора, находим искомые оценки. В табл. 4 представлено вычисление оценок по вариантам в целом для издержек.

Таблица 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	B1	B2	B3	Vector A	Bi1*Ai	Bi2*Ai	Bi3*Ai	Sum6-8
D1	0,54	0,65	0,64	0,73	0,39	0,12	0,06	0,57
D2	0,40	0,25	0,26	0,18	0,29	0,05	0,02	0,36
D3	0,06	0,10	0,10	0,09	0,05	0,02	0,01	0,07

Таблица 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	B1	B2	B3	Vector A	Bi1*Ai	Bi2*Ai	Bi3*Ai	Sum6-8
D1	0,31	0,60	0,56	0,72	0,22	0,11	0,05	0,39
D2	0,64	0,33	0,35	0,19	0,46	0,06	0,03	0,55
D3	0,05	0,06	0,10	0,10	0,04	0,01	0,01	0,06

Итоги работы представлены в табл. 5. Эффективность проекта, вычисленная как отношение оценок выгод и издержек оказалось максимальной для варианта 1, который и следует принять для строительства порта.

Таблица 5

Показатели	D1	D2	D3
Выгоды	0,57	0,36	0,08
Издержки	0,39	0,56	0,06
Эффекты	1,46	0,64	1,33

## 2. Практическая апробация разработанной методики

В Туапсе Союзморниипроектом и Черноморниипроектом были разработаны генеральные схемы развития порта. Разница предложений заключалась в том, что генсхема Черноморниипроекта предполагала строительство новых оградительных сооружений за существующими с выходом на большие глубины и использование ныне действующего порта, как части будущего нового. Генсхемой



Союзморниипроекта предлагалось строительства нового порта на новой территории за мысом Кадош, Обе схемы имели целый ряд преимуществ и недостатков по огромному числу факторов. В генсхемах более-менее детально были разработаны оценки капитальных вложений и эксплуатационных выгод и затрат. Такие аспекты, как социальные и экологические были отражены практически на чисто описательном уровне, и их оценка и сравнение на традиционном уровне была невозможен. Действительно, как сравнить количественно преимущества и недостатки прокладки ж.-д. тоннеля через густо застроенный горный массив, склоны которого имеют ярко выраженный оползневой характер в варианте Черноморниипроекта и плюсы и минусы перебазирования порта за мыс Кадош в варианте Союзморниипроекта, которая займет перспективную курортно-пляжную зону отдыха горожан, а также относительный вес этих решений в сравнении с основными техническими и экономическими решениями.

Автор предложил выполнить сравнительную комплексную оценку генсхм методом анализа иерархий выгод и издержек. От конкретного описания, представленного в предыдущем разделе, как более общем случае, отличие состоит в том, что в данном случае вместо трех вариантов анализировалось два. Попарное сравнение вариантов по каждой категории велось по девятибалльной шкале. Для взвешивания альтернатив и определения конкретных весов или приоритетов по каждой элементарной категории по вариантам генсхем была создана группа специалистов-экспертов, которая работала под руководством главного инженера МАП. По рекомендации автора был принят «корейский стиль» принятия решений, то - есть после детального обсуждения всех аспектов в случае, если специалисты не приходили к консенсусу, окончательное решение по количественным характеристикам принимал руководитель. Полученные результаты показали более высокую эффективность генсхемы развития порта Туапсе, разработанной Союзморниипроектом. Разработанный метод комплексной оценки компоновочных решений морских портов заслужил одобрение Заказчика и был рекомендован для оформления в качестве ведомственного документа.

**Вторую апробацию** эта методика прошла при проектировании Таманского нефтяного терминала в порту Железный Рог. Было рассмотрено два варианта: расположения технологических трубопроводов по доставке нефтепродуктов на причал: на соединительной эстакаде длиной 2645 м и по подводному трубопроводу той же длины. Стоимость строительства по обоим вариантам различалась незначительно, поэтому с особой тщательностью было необходимо рассмотреть экологические факторы, связанные с влиянием терминала на окружающую среду, а также социальные факторы, так как строительство терминала неоднозначно воспринималось жителями Таманского полуострова и административными инстанциями районного и краевого масштаба. В связи с тем, что эти факторы

оценить в численном выражении традиционными методами не представлялось возможным, было решено использовать Методику комплексной оценки проектов морских портов, разработанную автором. Для получения экспертных оценок была создана рабочая группа, состоящая из гидротехников и эколога. Сравнения вариантов по основным категориям и подкатегориям по девятибалльной шкале, «японским» методом, то есть обсуждение оценок велось до полного согласия экспертов. Были рассмотрены три основных категории оценок: экономические, социальные и экологические.

Экономические категории были разбиты на три подкатегории: капиталовложения, доходы от реализации, новые рабочие места.

Социальные – безопасность производства, профессиональная подготовка, напряженность социума

Экологические – воздействие на воздушную и водную среду, воздействие на сельскохозяйственные угодья, соблюдение санитарно – защитных норм, компенсационные мероприятия по причиненному ущербу. Граф иерархий представлен на рис 2.

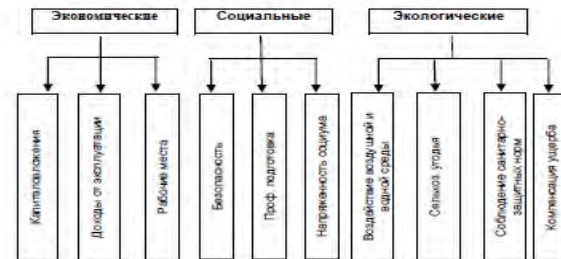


Рис. 2

Вычисление итогового соотношения вариантов представлено в табл. 6.

Таблица 6

A	вектор D1	вектор D2	вектор A	D1 * A	D2 * A
B1	0.53	0.47	0.72	0.38	0.34
B2	0.83	0.17	0.10	0.08	0.02
B3	0.56	0.44	0.18	0.10	0.08
D1, D2				0.56	0.44

Комплексная оценка вариантов показала, что вариант 1 с расположением нефтепроводов на эстакаде набрал 56%, а вариант 2 с подводным трубопроводом, несмотря на меньшую сметную стоимость, только 44%, то есть вариант 1 в 1.3 раза превосходит вариант 2.

**Третьим** применением методики было определение наиболее эффективного варианта компоновки ГТС транспортно-перегрузочного комплекса (ТПК) по перевалке угля на мысе Токи в бухте Мучке Хабаровского края, разработанного ООО «Морстройтехнология». С учётом особенностей естественного режима данного участка строительства ТПК особенное внимание проектировщиков при рассмотрении и оценке вариантов концентрировалось на периоде строительства: на его сроках, возможности строительства пионерным способом, влиянии условий открытой акватории и воздействия на ГТС ледовых нагрузок. В период эксплуатации

оценивалось удобство маневрирования судов на акватории и необходимость их разворота перед швартовкой, удобство удаления льда при помощи ледоколов и буксиров и самоочищение акватории от льда, а также защищённость ошвартованных судов от волнения, и дрейфа, и навала льда.

В соответствии со спецификой объекта нами за основные были приняты три категории: экономические, строительные и эксплуатационные. В свою очередь эти категории в соответствии с вышеизложенными характеристиками представлялись рядом подкатегорий. Графически эти иерархии представлены на рис 3.

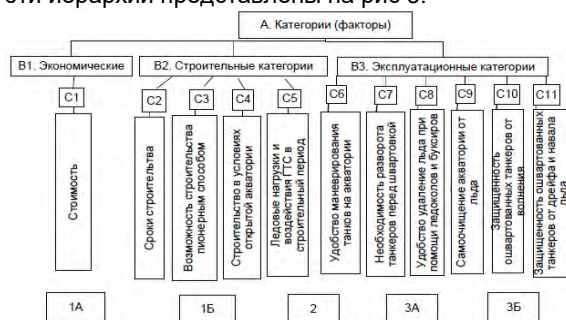


Рис.3

Данные экспертов были преобразованы, путём попарного сравнения вариантов по шкале оценок в баллах от 1 до 9, в обратно-симметричные квадратные матрицы. каждой подкатегории. Перемножением векторов вариантов по подкатегориям на вектора вариантов по основным категориям вычислялись вектора по вариантам для Вектора приоритетов матриц или главные собственные вектора матриц вычислялись усреднением по нормализованным столбцам. Сначала вычислялись значения собственных векторов для основных категорий, затем для подкатегорий, после этого, вычислялись значения вектора для каждого варианта компоновочных решений по основным категориям. И, наконец, перемножением этого вектора на собственный вектор были получены итоговые вектора по основным категориям по всем вариантам,

**Литература**

1. Горгуца Ю.В Новые методы принятия решений при проектировании и эксплуатации морских портов. Монография. – М. МГУ, изд. МАКС Пресс. 2001 г., 6 пл.
2. Руководстве по технологическому проектированию морских портов РД 31. 3. 01. 01-93
3. Нормы технологического проектирования морских портов РД 31. 3. 05-97
4. Нормы технологического проектирования морских портов. СП 350. 1 326000. 2018
5. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. - М, Радио и связь. 1993.

**References**

1. Gorgutsa Y.V Novye metody prinyatiya resheniy pri proektirovani i ekspluatatsii morskikh portov. Monografiya. – М. MGU, izdatel'stvo MAKS Press. 2001 g., 6 p.l.
2. Rukovodstvo po tekhnologicheskomu proektirovaniyu morskikh portov RD 31. 3. 01. 01-93
3. Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov RD 31. 3. 05-97
4. Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov. SP 350. 1 326000. 2018
5. Saati T.L. Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy. - M, Radio i svyaz'. 1998.

суммируя которые по столбцам получаем итоговые значения оценки эффективности по вариантам – табл. 7.

Таблица 7

A	1A	1B	2	3A	3B	Vector A	1A*Ai	1B*Ai	2*Ai	3A*Ai	3B*Ai	SumB-12
B1	0,23	0,20	0,23	0,17	0,17	0,35	0,07	0,07	0,08	0,06	0,06	0,34
B2	0,25	0,19	0,22	0,16	0,18	0,27	0,10	0,05	0,06	0,04	0,05	0,30
B3	0,21	0,25	0,18	0,17	0,20	0,38	0,06	0,09	0,07	0,06	0,08	0,36
Итоговые результаты по вариантам							0,23	0,21	0,21	0,17	0,18	1,01

Наилучшим оказался вариант 1А, что соответствует анализу по экспортным оценкам ООО «МСТ» но данная методика позволяет более точно определить соотношение оценок вариантов по всем категориям и подкатегориям и реально увидеть зависимость итоговых результатов буквально от каждой оценки.

**Заключение**

1. В действующих Нормх технологического проектирования морских портов отсутствует методика оценки вариантов компоновки морских портов.
2. Разработан метод комплексной оценки эффективности компоновочных решений проектов морских портов с помощью анализа иерархий.
3. Рассматриваются выгоды и издержки вариантов по трём основным категориям: экономические, социальные и экологические.
4. Каждая основная категория разбивается на несколько подкатегорий.
5. Вычисления ведутся на базе экспертных оценок в матричной форме и по правилам матриц.
6. За критерий эффективности при выборе варианта принимается отношение выгод проекта к его издержкам, определенное по всем вариантам с учётом их значимости по каждой категории и подкатегории.
7. Тот вариант, где этот критерий максимален считается наилучшим.
8. Метод апробирован на выборе эффективной генсхемы развития порта Туапсе, выбора оптимального варианта компоновки порта Железный Рог и варианта компоновки ГТС ТПК в бухте Мучке Хабаровского края.

УДК 629.5.051; 656.052

## СОЗДАНИЕ БЕСПИЛОТНОЙ ЗОНЫ Е-НАВИГАЦИИ НА ПРИМЕРЕ АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО КАСПИЯ И ПОДХОДАХ К МОРСКОМУ ТОРГОВОМУ ПОРТУ «ОЛЯ»

**Алексей Валерьевич Титов**

кандидат технических наук, руководитель Инженерного проектного офиса  
Астраханский государственный университет  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а  
e-mail: pochta\_414000@list.ru

**Лама Али Баракат**

аспирант кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления»  
Астраханский государственный технический университет  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16  
e-mail: lama.barakat@mail.ru

**Аким Владимирович Павлов**

директор Инжинирингового центра  
Астраханский государственный университет  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а  
e-mail: pavlov.akim@gmail.com

**Василий Александрович Чанчиков**

кандидат технических наук, заместитель руководителя Инженерного проектного офиса  
Астраханский государственный университет  
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 20а  
e-mail: bazelius87@mail.ru

### Аннотация

Рассмотрены особенности и условия создания беспилотной зоны Е-навигации на примере акватории Северного Каспия с учетом существующего состояния инфраструктуры Волго-Каспийского морского судоходного канала и Международного морского торгового порта «Оля».

Беспилотная зона Е-Навигации является цифровой инфраструктурой для безэкипажных судов, обеспечивающей береговые морские и речные сегменты для формирования глобальной цифровой навигации.

В работе проведена детальная проработка вопроса по созданию беспилотной зоны для практической реализации технологии Е-Навигации в акватории Северного Каспия и на подходах к порту «Оля». Исследование позволит сформировать комплексный подход для цифровой навигации в рамках реализации научных проектов «Морская многоцелевая беспилотная платформа» и «Разработка и апробация систем машинного зрения для безэкипажных судов на примере электрокатамарана «Эковолна».

Проект беспилотной зоны Е-Навигации относится к стратегическому плану ИМО, направленному на совершенствование навигационной системы обеспечения безопасности и предоставление навигационной информации для безэкипажных судов.

В данной работе рассматриваются инновационные сервисы Е-Навигации и основные технологические составляющие, которыми являются судовые системы, береговые системы, глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС) и система VDES.

В статье представлена авторская архитектура беспилотной зоны Е-Навигации, подходящей к морскому торговому порту «Оля», разработанная на основе анализа его инфраструктуры и подходах к нему.

Для апробации решений в тестовой зоне Е-Навигации в акватории Северного Каспия и на подходах к порту «Оля» предлагается оснастить безэкипажное судно «Эковолна» универсальной навигационно-коммуникативной системой сбора, передачи и обработки телеметрических данных.

**Ключевые слова:** цифровая навигация, безэкипажное судоходство, глобальная навигационная спутниковая система, безэкипажное судно, автоматическая идентификационная система, тестовая акватория, система управления движением судов.

## SETTING UP OF AN UNMANNED E-NAVIGATION ZONE ON THE EXAMPLE OF THE NORTHERN CASPIAN SEA WATER AREA AND APPROACHES TO THE COMMERCIAL SEA PORT "OLYA"

**Alexey V. Titov**

Cand. Sci. Tech., the head of Engineering Project Office  
Astrakhan State University  
Tatishcheva, 20a, Astrakhan, 414056, Russian Federation  
e-mail: pochta\_414000@list.ru

**Lama A. Barakat**

the postgraduate student of department "Automatic information processing and control systems"  
Astrakhan State Technical University  
Tatishcheva, 16, Astrakhan, 414056, Russian Federation  
e-mail: lama.barakat@mail.ru

**Akim V. Pavlov**

the head of Engineering Center  
Astrakhan State University  
Tatishcheva, 20a, Astrakhan, 414056, Russian Federation  
e-mail: pavlov.akim@gmail.com

**Vasiliy A. Chanchikov**

Cand. Sci. Tech., the deputy head of Engineering Project Office  
Astrakhan State University  
Tatishcheva, 20a, Astrakhan, 414056, Russian Federation  
e-mail: bazelius87@mail.ru

**Abstract**

The article considers peculiarities and conditions of implementation of an unmanned E-Navigation zone on the example of the northern Caspian Sea water area based on the infrastructure current state of the Volga-Caspian shipping channel and the international commercial sea port "Olya".

The unmanned E-Navigation zone is a digital infrastructure for unmanned vessels, providing the shore marine and river segments to form a global digital navigation.

This research includes a detailed study of an unmanned zone establishment for the practical implementation of E-Navigation technology in the Northern Caspian Sea water area and on the approaches to the port "Olya". The study will form an integrated approach for digital navigation as part of the implementation of the scientific projects "Unmanned marine multipurpose platform" and "Development and testing of machine vision systems for unmanned vessels on the example of the electric catamaran "Ekovolna".

The unmanned E-Navigation zone project is a part of the IMO strategic plan aimed at improving the navigation safety system and providing navigation information for unmanned vessels.

This paper discusses the innovative E-Navigation services and the main technological components, which are ship systems, shore systems, global navigation satellite system (GLONASS) and VHF Data Exchange System.

The article presents the author's architecture of the unmanned e-Navigation zone suitable for the commercial sea port "Olya", developed on the basis of the analysis of its infrastructure and approaches to it.

To test the solutions in the E-Navigation test zone in the Northern Caspian Sea and on the approaches to the port "Olya", it is proposed to equip the unmanned vessel "Ekovolna" with a universal navigation and communication system for collecting, transmitting and processing telemetry data.

**Key words:** digital navigation, unmanned shipping, global navigation satellite system, unmanned vessel, automatic identification system, testbed, vessel traffic management system.

**Введение**

Е-Навигацию можно считать одной из основных инициатив международной морской организацией (ИМО) для обеспечения безопасности судоходства за счет сбора, организации, обмена, интеграции и анализа морских данных на судах и на берегу при помощи современного навигационного оборудования.

Согласно отчету ИМО (MSC 85/26/Add.1 ANNEX 20), концепция Е-Навигации была создана на основе того факта, что аварии из-за человеческого фактора составляют около 60% всех морских столкновений и посадок на мель.

В настоящее время в ходе реализации международного стратегического плана Е-Навигации все больше внимания уделяется созданию тестовых акваторий (ТА) (testbeds), которые в свою очередь предназначены для демонстрации концепции Е-Навигации и разработки мирового сегмента морской коммуникационной платформы.

ТА определяется как «...платформа для строгого, прозрачного и воспроизводимого тестирования проектов Е-Навигации с помощью

научных теорий, вычислительных инструментов и новых технологий» (отчет ИМО (MSC.1/Circ.1494 Annex).

Ожидается, что по мере перехода от концепции Е-Навигации к практической реальности значение ТА будет продолжать расти.

Данное исследование включает в себя детальную проработку вопроса по созданию беспилотной зоны для практической реализации технологии Е-Навигации в акватории Северного Каспия, подходящей к порту Оля, и внедрение комплексных решений для цифровой навигации в рамках реализации научных проектов «Морская многоцелевая беспилотная платформа» и «Разработка и апробация систем машинного зрения для безэкипажных судов на примере электрокатамарана «Эковолна».

**1. Концепция беспилотной зоны Е-Навигации**

Беспилотная зона Е-Навигации представляет собой цифровую инфраструктуру на безэкипажных судах и береговых морских и речных сегментах, обеспечивающую условия формирования глобальной цифровой навигации.

При создании беспилотной зоны цифровой навигации на основе навигационных, информационных и телекоммуникационных технологий станет возможным получить значительные улучшения в качестве электронных навигационных карт, внести конкретный вклад в эффективный, безопасный и экологический чистый морской и речной транспорт и обеспечивать более высокую эффективность морских перевозок. Также возможно увеличить надежность и целостность навигационных систем и снизить расходы на транспортировку грузов.

В рамках исследования запланировано проведение анализа существующего состояния инфраструктуры Волго-Каспийского морского судоходного канала и международного морского торгового порта Оля. А затем реализовать и отработать алгоритмы взаимодействия элементов инфраструктуры в целях развития безэкипажного судоходства на Каспии.

## **2. Инфраструктура морского торгового порта Оля**

Международный торговый порт «Оля» расположен в устьевой части р. Волга, в рукаве р. Бахтемир, и пролегает от 65,3 километра Волго-Каспийского морского судоходного канала. К основным элементам инфраструктуры морского порта относятся: станции глобальных навигационных спутниковых систем (ГЛОНАСС/GPS); системы мониторинга и сигнализации; системы управления движением судов (СУДС); береговые станции глобальной морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности (ГМССБ); береговые станции службы НАВТЕКС и информационные системы [1]. Согласно приказу Минтранса России от 22 марта 2012 года №74, порт открыт для навигации круглый год.

На порты Астрахань и Оля осуществляется работа с СУДС Астраханского филиала ФГУП «Росморпорта», которая включает в себя центр СУДС и четыре радиотехнических поста (РТП)

расположены в морских портах Астрахань и Оля, на острове Искусственный и на острове на 145 км Волго-Каспийского морского судоходного канала (ВКМСК) соответственно (рис. 1).

СУДС обеспечивает организацию движения судов с целью предотвращения развития опасных ситуаций, передачу судам навигационной, оперативной и иной информации, а также навигационную помощь по запросу судна или по решению оператора СУДС портов Астрахань и Оля преимущественно в сложных гидрометеорологических условиях [2].

Район действия СУДС включает в себя часть акватории порта Оля от 65,3 км ВКМСК до 170 км ВКМСК и акваторию порта Астрахань от 3029 км реки Волга до 65,3 км ВКМСК. СУДС порта Оля круглосуточно обеспечивает слуховую вахту на каналах вызова в 16 и 69 очень высокой частоты (ОВЧ) для целей обеспечения безопасного и эффективного судоходства [3].

Компания «Транзас» строила региональную систему безопасности мореплавания (РСБМ) на акватории портов Астрахань и Оля и подходов к ним. В 2010 году для мониторинга судоходства на Волге было продолжено строительство сети из 44 береговых базовых станций автоматической идентификационной системы (АИС) [4]. СУДС, отвечающая за нижнюю морскую часть от Астрахани, были поставлены компанией «Транзас».

На основе представленных на рисунке 1 данных можно сделать выводы о том, что рабочая зона береговых станций АИС полностью покрывает зону действия СУДС морских портов Астрахань и Оля.

## **3. Построение беспилотной зоны Е-Навигации (общие принципы)**

Методика работы над проектом беспилотной зоны Е-Навигации состоит из восьми этапов, продемонстрированных на рисунке 2.

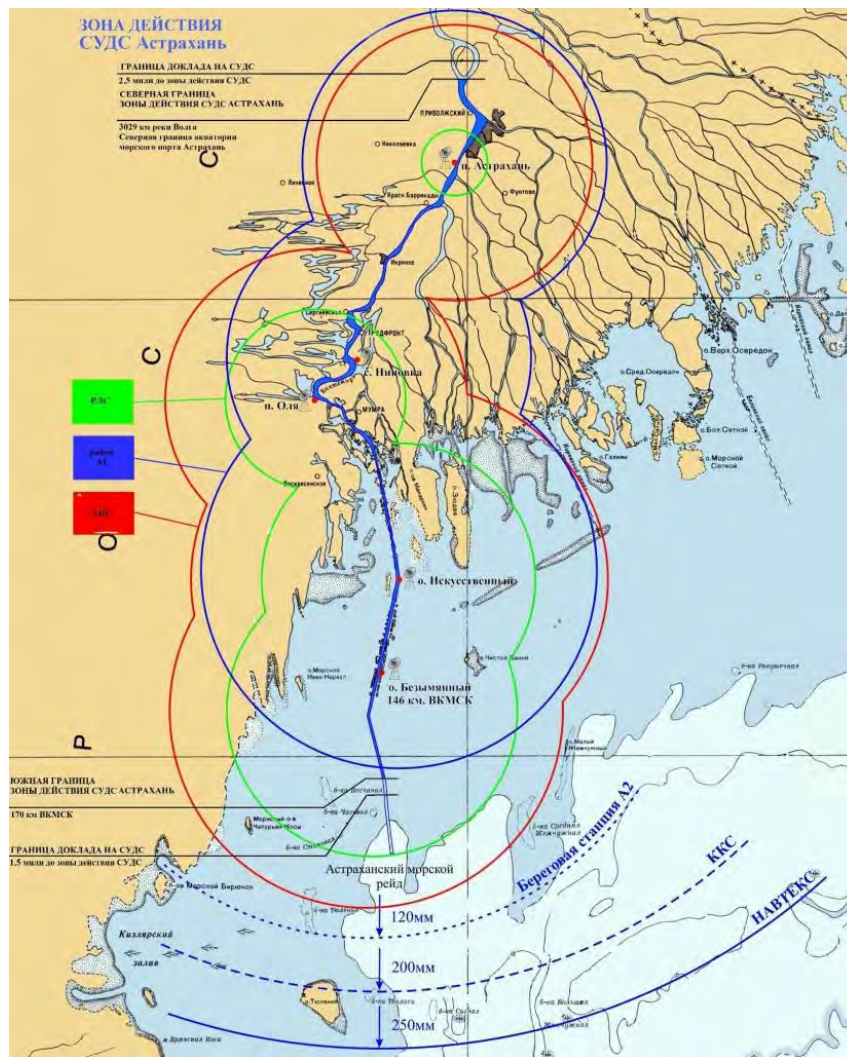


Рис. 1. Зона действия СУДС портов Астрахань и Оля [2]

Под исследованием состояния и перспектив реализации технологии Е-Навигации в широком плане понимается:

1. анализ международных документов ИМО, международной ассоциации морских средств навигации и маячных служб (МАМС) (IALA – International Association of Lighthouse Authorities), международной гидрографической организации (МГО) (IHO – International Hydrographic Organization), Комитета по безопасности на море (КБМ) (MSC – Maritime Safety Committee) и национального Комитета по поиску и спасанию (НКПС) (NCSR – Sub-Committee on Navigation, Communications and Search and Rescue) по Е-Навигации;

2. анализ существующих национальных и зарубежных проектов Е-Навигации, например, Эрмитаж; Создание пилотной зоны е-Навигации и технических средств Е-Навигации; SMART-Navigation; ACCSEAS; SESAME Straits; TICON; Yangshan Port e-NAV и пр.;

3. исследование и анализ состава существующих навигационных и информационных систем и выбор наиболее перспективных для безэкипажного судоходства.

Важным этапом в процессе создания инфраструктуры Е-Навигации в акватории порта Оля является разработка технических и организационных мер. Следует учитывать:

1. оценку рисков создания беспилотной зоны Е-Навигации;
2. определение режима работы беспилотной зоны Е-Навигации;
3. создание поэтапного плана реализации проекта.

Веб-портал беспилотной зоны в интегрированный комплекс должен включать:

1. необходимую информацию о проекте (сегменты, цели и задачи, участники);
2. раздел «архив Е-Навигации» для популяризации этой технологии в России;
3. раздел «новости» для публикации самой актуальной информации о проекте.



Рис. 2. Этапы создания беспилотной зоны Е-Навигации в порте Оля

Для внедрения и реализации сервисов Е-Навигации в режимах «судно-берег» и «берег-судно» на основе современных Е-Навигационных систем необходимо учитывать особенности Волго-Каспийского морского судоходного канала. Следует разработать береговую станцию автоматической системы обмена данными в ОБЧ-диапазоне (VDES – VHF Data Exchange System) морской подвижной службы как канал связи.

Информационные сервисы порта Оля должны включать:

1. автоматическую передачу информации о планируемом заходе БЭС в порт для оптимизации трафика движения судов и сокращения времени ожидания прибытия в порт;

2. услуги удлиненного управления БЭС;

3. автоматическое планирование маршрутов движения БЭС в акватории порта для снижения риска столкновения судов и посадки на мель.

После проведения испытаний беспилотной зоны Е-Навигации и анализа результатов, необходимо провести соответствующие корректирующие действия по проекту.

#### 4. Состав проекта беспилотной зоны Е-Навигации

Проект беспилотной зоны Е-Навигации ориентирован на морское движение на Северном

Каспии, предоставляя навигационные услуги для безэкипажных судов.

Проект относится к стратегическому плану ИМО для реализации Е-Навигации, в котором определены пять решений, второе из которых представляет собой автоматизированную отчетность о движении судов к берегу. Одним из ключевых аспектов этого проекта является автоматизация передачи судовой навигационной информации на берег, а также автоматизация других услуг Е-Навигации. Поэтому целью проекта является совершенствование навигационных систем для обеспечения безопасности и предоставления надежной и эффективной навигационной информации безэкипажным судам путем внедрения и реализации Е-Навигации.

В проекте будут применяться инновационные сервисы Е-Навигации, включая технологию ситуационной осведомленности о морском движении и реагирования на навигационную опасность на основе системы мониторинга движения в реальном времени вместе с информацией о местоположении судна. Они также включают технологии оценки рисков для выявленных навигационных опасностей.

Технологическими составляющими проекта являются судовые системы, береговые системы, глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС) и система VDES (рис. 3).

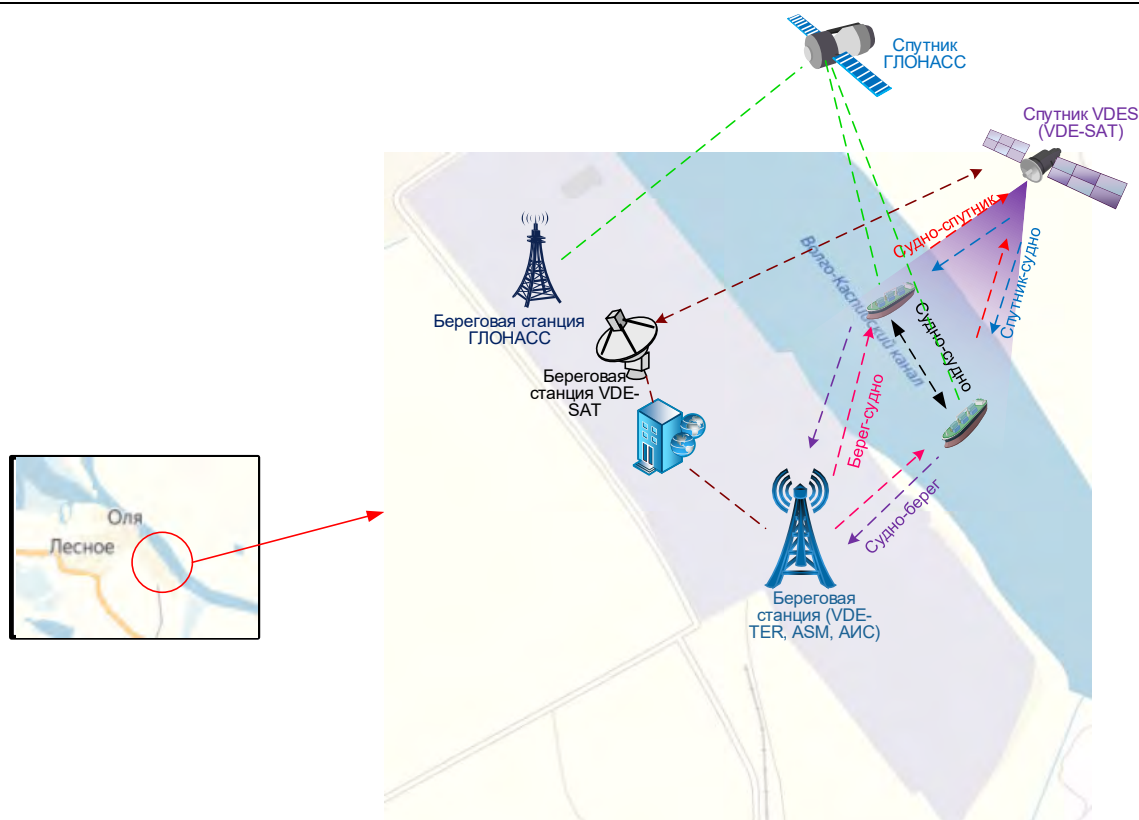


Рис. 3. Архитектура беспилотной зоны E-Навигации, подходящей к порту Оля (авторская разработка)

VDES является новым термином, используемым МАМС [5]. Система предназначена для обеспечения более высокого, надежного и глобального обмена данными в диапазоне ОВЧ морской подвижной службы. Она работает с АИС на основе новой технологии передачи данных, используя несколько новых частот, которые становятся доступными для цифровой морской навигации для достижения более гладкой связи.

Согласно рекомендациям МСЭ-R М.2092-0 (10/2015), VDES объединяет функции обмена данными в диапазоне ОВЧ (VDE – VHF data exchange), специальных сообщений применений (ASM – Application Specific Messages) и АИС в полосе ОВЧ морской подвижной службы, что обеспечивает повышенную способность обмена данными в глобальном масштабе посредством передачи и приема данных, как на земле, так и со спутников.

VDE включает наземный (VDE-TER) и спутниковый (VDE-SAT) сегменты: наземный для поддержки интенсивного движения транспорта в пределах зоны покрытия береговой станции VDE-TER (20-50 морских миль), а спутниковый для обеспечения доступа за пределы прямой видимости на берегу и уникального доступа к связи в открытом море через спутник на низкой околоземной орбите [6].

Следует отметить, что АИС является важным компонентом цифровой навигации для идентификации радиолокационных и визуальных целей. Данные АИС передаются четырьмя глобально выделенными частотами ОВЧ (161,975, 162,025, 156,775 и 156,825 МГц) скоростью передачи 9,6 кбит/с на каждой частоте. Передача данных по умолчанию осуществляется на каналах АИС1, АИС2, АИС LR1 и АИС LR1 по частотным каналам 2087, 2088, 75 и 76 соответственно [7, 8].

ASM представляют собой сообщения, которые были разработаны для обеспечения обмена информацией через частотные каналы, имеющие большую способность, чем каналы АИС. Структура данных сообщений должна оставаться такой, как определено в АИС. Это позволит постепенно переносить существующие ASM из каналов АИС в новые каналы ASM [9]. Обмен данными по умолчанию может осуществляться на каналах ASM1 и ASM2 через частотные каналы 2027 и 2028 соответственно.

На рисунке 4 показана скорость передачи цифровой информации в каналах АИС, ASM и VDE в соответствии с документом МАМС «IALA GUIDELINE/G1117/VHF DATA EXCHANGE SYSTEM (VDES) OVERVIEW» от декабря 2017 года.



Таблица 1

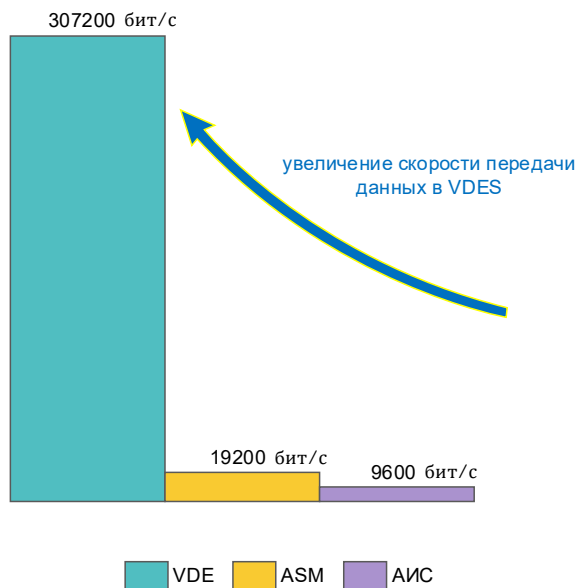


Рис. 4. Скорость передачи цифровой информации в VDES

Предполагается, что VDE-SAT позволяет осуществлять спутниковую связь в режимах «судно-спутник» и «спутник-судно», а VDE-TER - наземную связь в режимах «судно-судно», «судно-берег» и «берег-судно». Обмен данными с БЭС происходит автоматически в каналах ОБЧ с помощью одной комбинированной передающей / приемной антенной VDES.

VDE-TER обеспечивает более высокую пропускную способность и надежность для цифровой передачи данных, используя структуру сообщений, отличную от АИС и ASM.

Спутниковая связь в режиме «спутник-судно» (VDE-SAT DL) используется для передачи информации в широкоэвещательном режиме (например, информация о погодных и ледовых условиях) БЭС, находящимся в зоне покрытия спутника. А Спутниковая связь в режиме «судно-спутник» (VDE-SAT UL) обеспечивает обратную связь с БЭС из районов за пределы навигационной наземной инфраструктуры.

В соответствии с рекомендациями МСЭ-R М.2435-0 (11/2018), при обмене данными по каналам VDE будут использоваться разные частотные каналы, представлены в таблице 1.

Частотные каналы, используемые каналами VDE

Режим	частотный канал
судно-берег	1024, 1084, 1025, 1085
судно-спутник	1024, 1084, 1025, 1085, 1026, 1086
судно-судно	2024, 2084, 2025, 2085
берег-судно	2024, 2084, 2025, 2085
спутник-судно	2024, 2084, 2025, 2085, 2026, 2086

Технические характеристики связи в режимах «судно-спутник-берег» и «берег-спутник-судно» находятся в стадии разработки и будут рассмотрены на Всемирной конференции по радиосвязи (WRC-19) в Египте (28 октября - 22 ноября 2019 г.).

В качестве реализации данного проекта Е-Навигации предлагается использовать ГЛОНАСС, которая применяется в судоходстве при маневрировании судов в сложных условиях (на акваториях портов, в узкостях, в сложных ледовых условиях), проведении поисково-спасательной операции и навигации на внутренних водных путях с характеристиками сопоставимыми с АИС.

Согласно официальному сайту «Информационно-аналитический центр КВНО ФГУП ЦНИИмаш», технология ГЛОНАСС включает в себя три сегмента: в космический сегмент входят 24 используемых навигационных спутника; наземный сегмент, состоящий из космодрома, командно-измерительного комплекса и центра управления; и в состав пользовательского сегмента входит аппаратура потребителей.

Спутники ГЛОНАСС принимают с наземных станций управления навигационную информацию, которая передается обратно БЭС в составе навигационного сообщения. Данное сообщение содержит разные типы информации, необходимые для определения местоположения БЭС.

Интегральная доступность навигации наземного потребителя по системе ГЛОНАСС показана на рисунке 5.

На основе значения позиционного трехмерного геометрического фактора (PDOP <= 6) интегральная доступность системы ГЛОНАСС составляла 100% на территории России и около 99,7% в масштабах всей Земли.

Для повышения точности навигации в системе ГЛОНАСС используется дифференциальный (относительный) режим определений за счёт того, что ошибки измерения навигационных параметров судовых и базовых приёмников являются

коррелированными. По плану развития системы ГЛОНАСС в 2020 г. предполагается дальнейшее уменьшение погрешности в определении координат объектов [11].

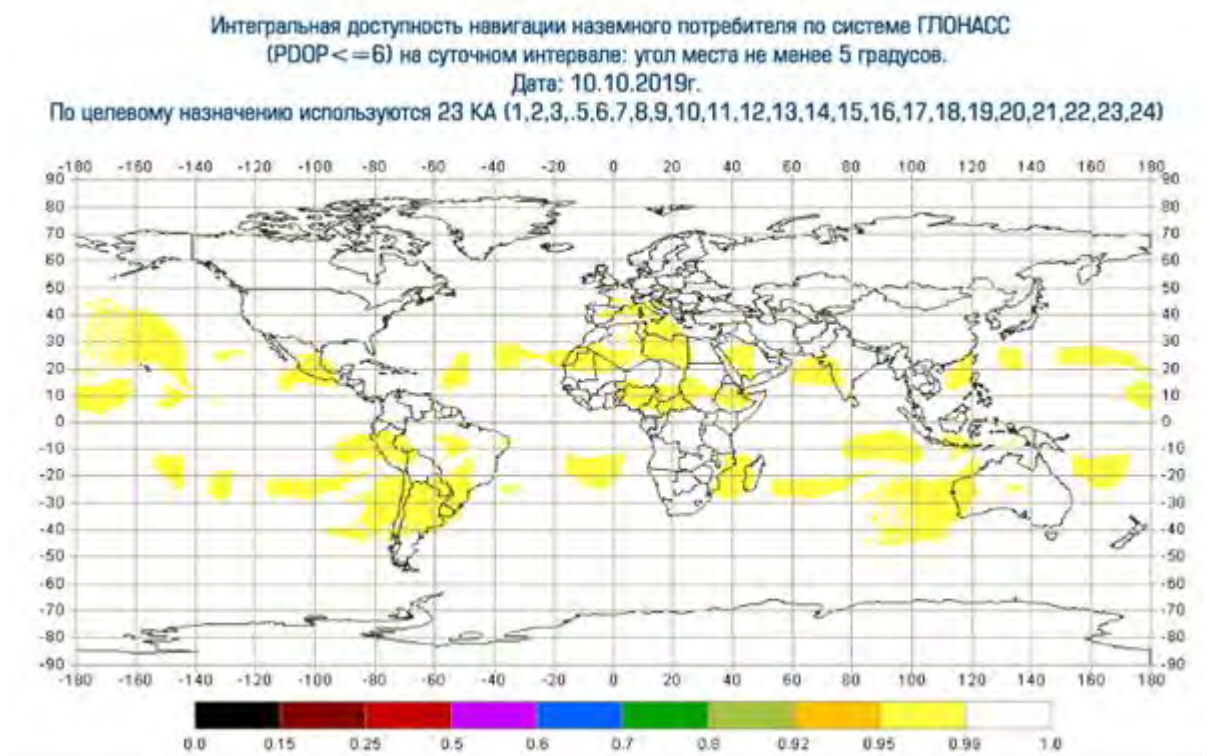


Рис. 5. Интегральная доступность навигации наземного потребителя по системе ГЛОНАСС [10]

### 5. Апробация решений в тестовой зоне E-Навигации в акватории С. Каспия и на подходах к порту Оля

Для проведения испытаний предлагается оснастить судно «Эковолна» универсальной навигационно-коммуникативной системой сбора, передачи и обработки телеметрических данных, которые позволят собирать информацию о параметрах работы и движения, а также производить обмен данными и входящей с датчиков информацией между судами с целью предсказания дальнейшей траектории движения, безопасного расхождения в соответствии с правилами МППСС; правилами движения и стоянки судов в бассейнах на внутренних водных путях Российской Федерации. Проект безэкипажного судна включает разработку комплекса сбора, обработки данных и автономной системы управления судном. Управление судном осуществляется в автоматическом режиме на базе разработанных алгоритмов с использованием элементов искусственного интеллекта. В блоке принятия решений анализируются отклонения обобщенных координат объектов от заданных в соответствии с курсом судна, обрабатывается информация о появляющихся препятствиях. Решения принимаются с использованием

элементов искусственного интеллекта (ИИ), включающего нейронные сети и адаптивные регуляторы. Разработанная система станет основой программно-аппаратного комплекса «Unmanned-Ship» для автоматизированного сбора реальных размеченных данных.

#### Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Развитие E-Навигации является примером прогресса морских навигационных технологий, которые позволят безопасно и эффективно использовать, и эксплуатировать современную инфраструктуру водных путей.
2. Создание беспилотной зоны E-Навигации совместно с применением технологий VDES и ГЛОНАСС может сыграть ключевую роль в повышении качества и эффективности навигации.
3. VDES можно считать более надежной системой связи, которая позволяет осуществлять высокоскоростной обмен данными в режимах «судно-судно», «судно-берег», «берег-судно», «судно-спутник» и «спутник-судно».
4. Апробация технологий безэкипажного судовождения на Каспии существенным образом повысит конкурентоспособность отечественной морской техники.

### Литература

1. Отчет об опытно-конструкторской работе по теме: «Создание тестовой акватории, обеспечивающей всестороннюю проверку и отработку разрабатываемых навигационных, связных, информационных систем и комплексов судовой и береговой иерархической инфраструктуры в рамках глобальной концепции e-Навигации» (шифр «e-More») – СПб.: АО «Кронштадт», 2016. 5 кн. с прил.
2. Титов А.В. Современное состояние и проблемы использования внутренних водных путей (на примере Волго-Каспийского морского судоходного канала): монография / А.В. Титов, С.Н. Зайкова, И.А. Волынский, А.А. Хмельницкая. – Пенза: Научно-издательский центр «Социосфера», 2017. – 528 с.
3. Роль портовой системы управления движением судов портов Астрахань и Оля в обеспечении безопасности судоходства // Транспорт Российской Федерации. Тематическое приложение №1. – 2014. – С. 58-59.
4. ЗАО «Транзас». Новости компании «Транзас» // Морской вестник. – 2011. – №1 (37). – С. 43-46.
5. Rødseth Ø. J. A system architecture for an unmanned ship/ Ø. J. Rødseth, Å. Tjora // Proceedings of the 13th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT). – 2014.
6. Rong S. Pectrum Sharing of VHF Data Exchange Satellite System/S.Rong, M. Wang //International Symposium on Communication Engineering & Computer Science (CECS 2018). – Atlantis Press, 2018. — pp.474-480.
7. Kvamstad B. A Case for Shore Based Digital Radio as Basis for e-Navigation / B. Kvamstad, Ø. J. Rødseth//MARINTEK Report. – 2008.
8. Базаров Ю.И. Новая морская цифровая связь для e-навигации / Ю.И. Базаров, М.И. Исмагилов, А.Н. Рогов // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – №3 (76). – С. 48-54.
9. Bober S. AIS next generation – the development of the VHF Data Exchange System (VDES) for maritime and inland navigation / S. Bober //the 8th International PIANCSMART Rivers Conference. – 2015.
10. Информационно-аналитический центр КВНО ФГУП ЦНИИмаш [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.glonass-iac.ru/GLONASS/CumulativeAvailability.php> (дата обращения: 10.10.2019).
11. Матвеев А.А. Обзор технических средств и методов спутниковой навигации судов / А.А. Матвеев, В.Н. Кузнецов, В.Д. Гаскаров // Вестник государственного университета морского и речного флота им. Адмирала С.О. Макарова. – 2016. – №1 (35). – С. 207-214.

### References

1. Otchet ob opytno-konstruktorskoy rabote po teme: «Sozdaniye testovoy akvatorii. obespechivayushchey vsestoronnyuyu proverku i otrabotku razrabatyvayemykh navigatsionnykh. svyaznykh. informatsionnykh sistem i kompleksov sudovoy i beregovoy iyerarkhicheskoy infrastruktury v ramkakh globalnoy kontseptsii e-Navigatsii» (shifr «e-More») – SPb.: AO «Kronshtadt». 2016. 5 kn. s pril.
2. Titov A.V. Sovremennoye sostoyaniye i problemy ispolzovaniya vnutrennikh vodnykh putey (na primere Volgo-Kaspiyskogo morskogo sudokhodnogo kanala): monografiya / A.V. Titov. S.N. Zaykova. I.A. Volynskiy. A.A. Khmel'nitskaya. – Penza: Nauchno-izdatelskiy tsentr «Sotsiosfera». 2017. – 528 s.
3. Rol portovoy sistemy upravleniya dvizheniyem sudov portov Astrakhan i Olya v obespechenii bezopasnosti sudokhodstva // Transport Rossiyskoy Federatsii. Tematicheskoye prilozheniye №1. – 2014. – S. 58–59.
4. ЗАО «Транзас». Novosti kompanii «Tranzas» // Morskoy vestnik. – 2011. – №1 (37). – S. 43-46.
5. Rødseth Ø. J. A system architecture for an unmanned ship / Ø.J. Rødseth, Å. Tjora // Proceedings of the 13th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT). – 2014.
6. Rong S. Pectrum Sharing of VHF Data Exchange Satellite System / S. Rong, M. Wang // International Symposium on Communication Engineering & Computer Science (CECS 2018). – Atlantis Press, 2018. – S. 474–480.
7. Kvamstad B. A Case for Shore Based Digital Radio as Basis for e-Navigation / B. Kvamstad, Ø.J. Rødseth // MARINTEK Report. – 2008.
8. Bazarov Yu.I. Novaya morskaya tsifrovaya svyaz dlya e-navigatsii / Yu.I. Bazarov. M.I. Ismagilov. A.N. Rogov // Transport rossiyskoy federatsii. – 2018. – №3 (76). – S. 48-54.
9. Bober S. AIS next generation – the development of the VHF Data Exchange System (VDES) for maritime and inland navigation / S. Bober // The 8th International PIANCSMART Rivers Conference. – 2015.
10. Informatsionno-analiticheskiy tsentr KVNO FGUP TsNIImash [Elektronnyy resurs]. — Rezhim dostupa: <https://www.glonass-iac.ru/GLONASS/CumulativeAvailability.php> (data obrashcheniya: 10.10.2019).
11. Matveyev A.A. Obzor tekhnicheskikh sredstv i metodov sputnikovoy navigatsii sudov / A.A. Matveyev. V.N. Kuznetsov. V.D. Gaskarov // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. Admirala S.O. Makarova. – 2016. – №1 (35). – S. 207-214.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 629.5.061.11

### ДИНАМИКА СУДНА С КОЛЕСНЫМ ДВИЖИТЕЛЬНО-РУЛЕВЫМ КОМПЛЕКСОМ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

**Владислав Ярославич Бычков**

аспирант кафедры радиоэлектроники  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603005, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: vim@vgavt-nn.ru

**Людмила Серафимовна Грошева**

кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603005, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: vim@vgavt-nn.ru

**Валерий Иванович Плющаев**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603005, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: vip@vgavt-nn.ru

#### Аннотация

Ветровое воздействие существенно усложняет процесс управления судном. Эта проблема остро стоит для судов нового типа с колесно-двигательным рулевым комплексом (КДРК). Эти суда имеют малую осадку, большую парусность, у них отсутствует руль, управление осуществляется двумя гребными колесами с независимыми приводами в кормовой части судна. При ручном управлении приводами колес не удается получить приемлемое качество управления.

В статье приведены результаты исследований динамических характеристик судна с КДРК при ветровом воздействии с использованием его математической модели.

Определены взаимосвязи вращающего момента судна при смещении центра парусности и параметров ветрового воздействия (направления и силы ветра). Определены величина и направление суммарного вектора упора гребных колес при разных соотношениях их частот вращения, а также радиус и траектория циркуляции при движении без ветра и с ветром с разными начальными условиями. Проведен анализ зависимости суммарного воздействия на судно (двигателей и ветра) от характеристик ветрового воздействия.

Разработан алгоритм управления приводами гребных колес, обеспечивающий удержание судна на заданной траектории в условиях ветрового воздействия. Приведены результаты математического моделирования процесса управления при реализации предложенного алгоритма управления в различных эксплуатационных режимах.

Полученные результаты использованы при проектировании интегрированной системы управления пассажирского судна с КДРК.

**Ключевые слова:** судно, колесный двигатель-рулевой комплекс, ветровое воздействие, динамические характеристики, алгоритм управления.

### DYNAMICS OF VESSEL WITH WHEEL PROPULSION STEERING SYSTEM UNDER EXTERNAL CONDITIONS

**Vladislav Y. Bychkov**

postgraduate student of the Department of Radio Electronics  
Volga state University of water transport  
603005, Nizhny Novgorod, Nesterov str., 5  
e-mail: vim@vgavt-nn.ru

**Lyudmila S. Grosheva**

PhD in Engineering Science, Associate Professor,  
associate Professor of the Department of Radio Electronics  
Volga state University of water transport  
603005, Nizhny Novgorod, Nesterov str., 5  
e-mail: vim@vgavt-nn.ru

**Valeriy I. Pluyshchaev**

Dr.Sci.Tech, Professor,  
head of the Department of Radio Electronics  
Volga state University of water transport  
603005, Nizhny Novgorod, Nesterov str., 5  
e-mail: vip@vgavt-nn.ru

**Abstract**

Wind impact significantly complicates the process of controlling the ship. This problem is acute for new type vessels with a wheel propulsion steering system (WPSS). These vessels have low draft, high sail, they do not have a rudder, and they are controlled by two paddle wheels with independent drives in the stern of the vessel. It is not possible to obtain an acceptable control quality with manual control of the wheel drives.

The article presents the research results of dynamic characteristics of the vessel with a WPSS under wind impact using its mathematical model.

The relationship of the ship's torque at the shift of the center of wind force application and the parameters of the wind effect (wind direction and strength) is determined.

The magnitude and direction of the total thrust vector of the paddle wheels are determined at different ratios of their rotation frequencies, as well as the radius and trajectory of circulation when moving without wind and with wind with different initial conditions. The authors analyse the dependence of the total impact (propulsion and wind) on the ship on the wind impact characteristics.

An algorithm for controlling the propeller wheel drives has been developed. The algorithm ensures keeping the vessel on a given trajectory under wind impact. The results of mathematical modeling of the control process during the implementation of the proposed control algorithm in various operating modes are presented.

The obtained results were used in the design of an integrated passenger ship control system with WPSS.

**Key words:** ship, wheel propulsion steering complex, wind impact, dynamic characteristics, control algorithm.

Ветер оказывает существенное влияние на процесс управления судном. Степень влияния ветра зависит от его силы и направления, геометрии корпуса, курса и скорости движения судна. Особенно это актуально для судов речного флота, что связано со спецификой их эксплуатации. Речные суда (особенно пассажирские) имеют сравнительно малую осадку, большую площадь парусности, вынуждены двигаться по относительно узкому судовому ходу с большим числом поворотов, часто производить швартовые операции.

Особо можно выделить новый класс пассажирских судов с инновационным колесным движительно-рулевым комплексом (КДРК) [1,2]. Движение и маневрирование судна осуществляется за счет двух гребных колес, расположенных по бортам в кормовой части судна. В качестве приводов колес используются асинхронные двигатели с частотными преобразователями, позволяющими выбирать направление вращения и плавно регулировать частоту вращения колес. Традиционный руль отсутствует. В настоящее время эксплуатируются три судна с КДРК («Сура», «Колесовъ» и «Доброходъ») и строится круизное судно «Золотое кольцо» (на последнем дополнительно установлено азимутальное подруливающее устройство).

При внушительных размерах 81,6 \* 13,8 \* 9,5 м судно «Золотое кольцо» (рис. 1) при полной загрузке имеет осадку всего 1.2 м. Площади боковой и поперечной проекций составляют 680 м<sup>2</sup> и 113 м<sup>2</sup>, соответственно.



Рис. 1. Пассажирское судно «Золотое кольцо»

Очень большое влияние на динамические характеристики судна оказывает положение центра парусности (ЦП). Учитывая большую площадь поперечной проекции, его смещение приводит к значительным изменениям вращающего момента, вызываемого ветровым воздействием. На рис.2 приведены расчетные значения вращающих моментов, действующих на судно, в зависимости от направления ветра (при скорости ветра 3 м/с) и величины смещения ( $\Delta$ ) центра парусности от центра масс (ЦМ) в пределах от +14 м до -14 м. Величина смещения ЦП в основном может меняться в зависимости от конструктивных особенностей верхней палубы (варианта выполнения ограждений – сплошного или сетчатого, размещения тента и пр.). Так при максимальном смещении ЦП к корме (от 0 до 14 м) величина вращающего момента меняется от 8900 до 54400 Н\*м [3].

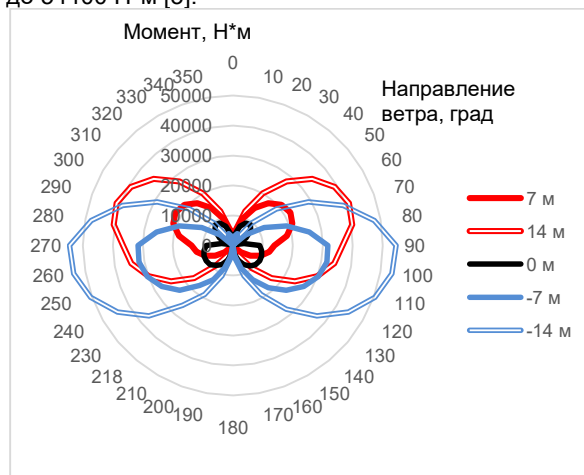


Рис. 2. Зависимость разворачивающего момента от направления ветра и смещения центра парусности судна «Золотое кольцо»

Очевидно, что для судна такого рода ветер будет иметь определяющее влияние на качество процесса управления при его удержании на курсе,

следовании по заданной траектории и швартовых операциях.

На рис. 3 приведены траектории движения судна при разных значениях смещения  $\Delta$  в диапазоне от

-14 м до 14 м для постоянной частоты вращения гребных колес  $n_1 = n_2 = 0.7$   $n_{max} = 0.33$  1/с при отсутствии управления. Ветер появляется в момент  $t = 200$  с, его направление перпендикулярно правому борту, скорость равна 7 м/с (или 25.2 км/ч), при этом скорость судна равна  $V_c = 3.7$  м/с (или 13.3 км/ч). Как показывают расчеты, при различных соотношениях смещения ЦП от ЦМ, силы и направления ветра, скорости судна можно получить любую траекторию движения судна.

Для судов такого типа чрезвычайно важную роль будет играть система управления, обеспечивающая высокое качество управления в сложных эксплуатационных условиях.

Цель данной работы – исследование динамики судна и разработка алгоритмов управления, обеспечивающих движение и маневрирование судна в сложных условиях, а также исследование динамических характеристик судна при реализации предложенных алгоритмов.

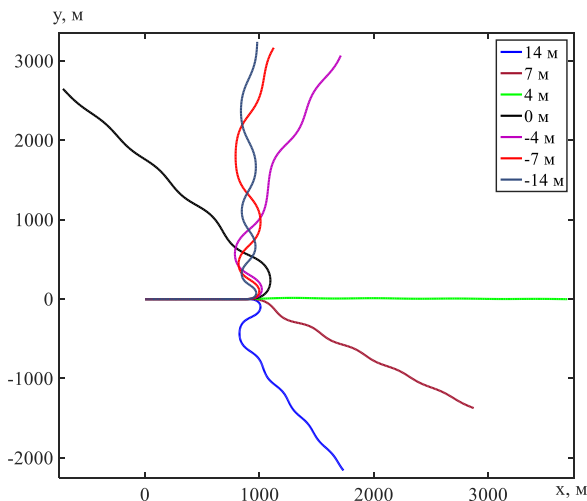


Рис. 3. Возможные траектории движения судна при ветровом воздействии

Поскольку у судна с КДРК отсутствует традиционный руль, маневрирование осуществляется за счет изменения соотношения частот вращения гребных колес  $n_1/n_2$ . При этом меняется величина и направление ( $\vartheta$ ) суммарного упора  $P_k$ , равного сумме упора левого и правого колес  $P_{k1}$  и  $P_{k2}$ . На рис. 4 приведены зависимости величины и направления суммарного упора  $P_k$  от соотношения частот вращения гребных колес.

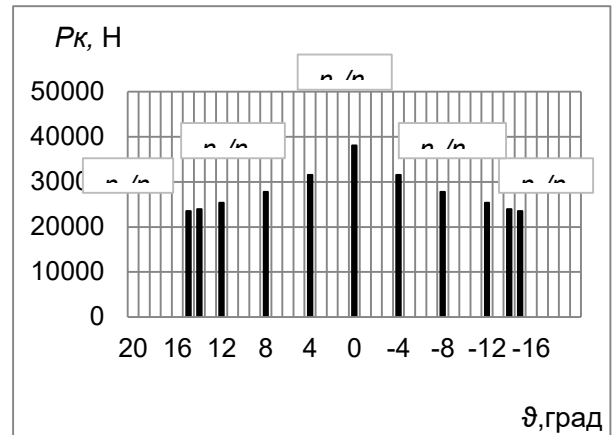


Рис. 4. Зависимость величины и направления суммарного упора гребных колес от соотношения частот вращения колес  $n_1/n_2$

Максимальный упор наблюдается при синхронном вращении гребных колес (направлен вдоль диаметральной плоскости (ДП) судна под углом  $\varphi_k = 0$ ). При сохранении частоты вращения одного из колес и снижении частоты вращения другого колеса (на рис. 4 на 20%, 40%, 60%, 80% и 100% до полной остановки) суммарный упор снижается более, чем в 1.6 раза, а направление вектора суммарного упора меняется от  $0^\circ$  до  $\pm 15^\circ$  (это угол между плоскостью гребных колес и ДП судна). Таким образом, для управления судном может быть использован упор гребных колес, меняющийся по величине в пределах от 0 до 38000 Н, а по направлению в пределах от  $-15^\circ$  до  $+15^\circ$ . На рис.5 показана зависимость радиуса циркуляции, а также направления вектора упора от соотношения частот вращения гребных колес.

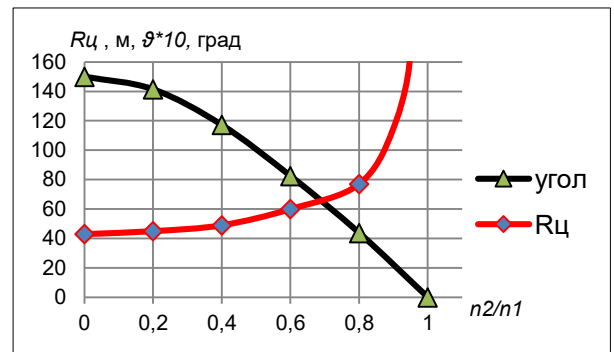


Рис. 5. Зависимость радиуса циркуляции и направления суммарного упора гребных колес от соотношения частот вращения колес  $n_1/n_2$

При маневрировании может быть использован режим вращения колес в противоположных направлениях (следует отметить, что эффективность действия колес при вращении в обратном направлении снижается – в принятой модели на 10%). При использовании этого режима (одно из колес вращается в прямом направлении с

максимальной частотой, второе колесо вращается в обратном направлении с изменением частоты от 0 до  $n_{max}$ ) вектор суммарного упора меняет свое направление в пределах  $15^\circ - 79^\circ$  (или  $-15^\circ - -79^\circ$ ), при этом его величина меняется в пределах от 18000 Н до 23000 Н. Минимальный радиус циркуляции получается при разнонаправленном вращении колес с максимальной частотой, судно совершает поворот практически на месте. Однако при эксплуатации судна целесообразно использовать режим с однонаправленным вращением колес, поскольку в этом случае не возникают механические перегрузки в приводах колес при реверсе направления вращения.

На рис. 6 приведены результаты расчетов циркуляции судна при разных условиях (а – при отсутствии ветра, б – при ветре в правый борт) для  $n_1 = n_{max}$ ,  $n_2 = -n_{max}$ . На рис. 6а изображен выход судна на циркуляцию при нулевой скорости движения (1) и при максимальной скорости движения судна (2). Установившийся радиус циркуляции одинаков в обоих случаях. На рис. 6б показано влияние ветра на процесс выхода судна на устойчивую циркуляцию. Ветер приводит не только к смещению центра циркуляции, но и к уменьшению радиуса циркуляции.

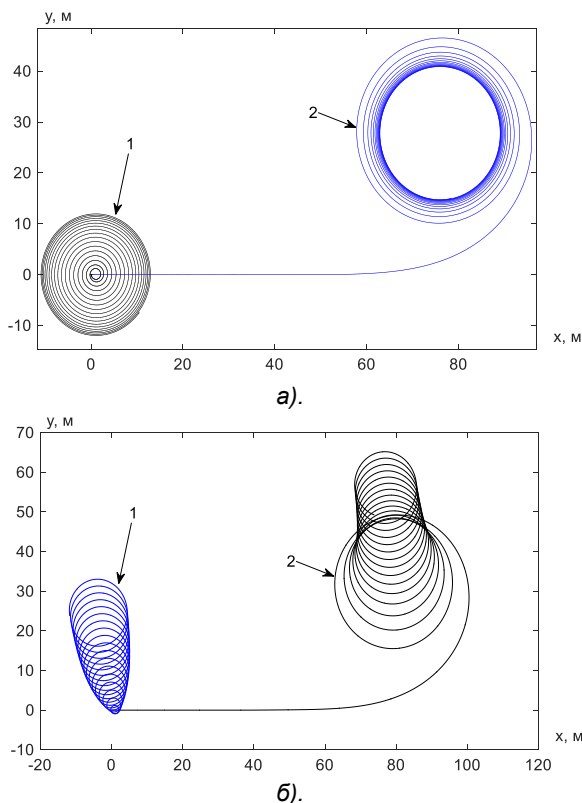


Рис. 6. Варианты циркуляции судна при  $n_1 = n_{max}$  и  $n_2 = -n_{max}$ :  
а – без ветра;

б – с ветром (направление перпендикулярно правому борту, скорость равна 7 м/с (или 25.2 км/ч))

Суммарный вектор сил, действующих на судно, можно определить, как сумму вектора  $P_k$  упора двух гребных колес и вектора  $P_v$  ветрового воздействия. (рис. 7). Система координат  $x'y'$  связана с судном и

повернута относительно неподвижной системы координат на угол  $\gamma$ . Угол  $\varphi$  может меняться в пределах от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , суммарный упор колес и сила ветрового воздействия также варьируются в широком диапазоне.

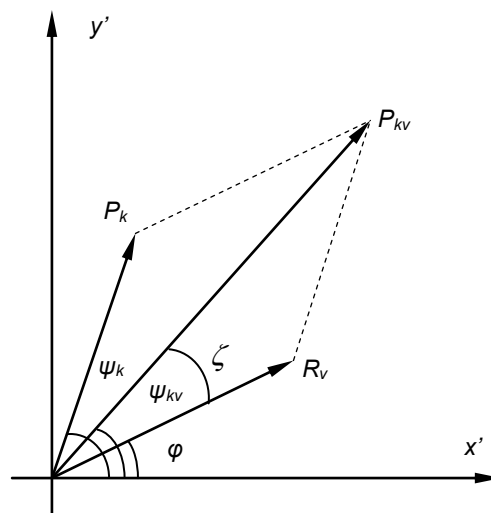


Рис. 7. Определение суммарного вектора сил, действующих на судно ( $\psi_k$  – угол вектора упора,  $\psi_{kv}$  – угол суммарного вектора сил, действующих на судно,  $\varphi$  – угол вектора кажущегося ветра)

В общем виде для любого соотношения углов векторов величину суммарного вектора можно вычислить как

$$P_{kv} = \sqrt{P_k^2 + R_v^2 + 2 \cdot |P_k| |R_v| \cos(\psi_k - \varphi)},$$

а направление суммарного вектора сил определяется как

$$\psi_{kv} = \begin{cases} \varphi + \arccos \zeta & \text{при } \varphi \leq \psi_k \leq \varphi + \pi; \\ \varphi - \arccos \zeta & \text{при } 0 \leq \psi_k \leq \varphi, \varphi + \pi \leq \psi_k \leq 2\pi; \\ \text{для } 0 \leq \psi_k \leq \pi; \\ \varphi - \arccos \zeta & \text{при } \varphi - \pi \leq \psi_k \leq \varphi; \\ \varphi + \arccos \zeta & \text{при } 0 \leq \psi_k \leq \varphi - \pi, \varphi \leq \psi_k \leq 2\pi; \\ \text{для } \pi < \psi_k < 2\pi; \end{cases}$$

$$\text{где } \zeta = \frac{P_{kv}^2 + R_v^2 - P_k^2}{2 \cdot P_k R_v}.$$

Зависимость изменения угла суммарного вектора сил  $P_{kv}$  при изменении направления (от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ ) и скорости ветра (от 0 до 15 м/с с шагом 0.25 м/с) показана на рис. 8а. При этом судно движется по прямолинейной траектории с максимальной скоростью ( $n_1 = n_2 = n_{max}$ ). Очевидно, при направлениях ветра совпадающих с ДП судна угол вектора  $P_{kv}$  равен  $\psi_{kv} = 0$ . Максимальные углы для вектора  $P_{kv}$  (около  $150^\circ$ ) наблюдаются при направлениях ветра  $\varphi = 160^\circ$  и  $200^\circ$ .

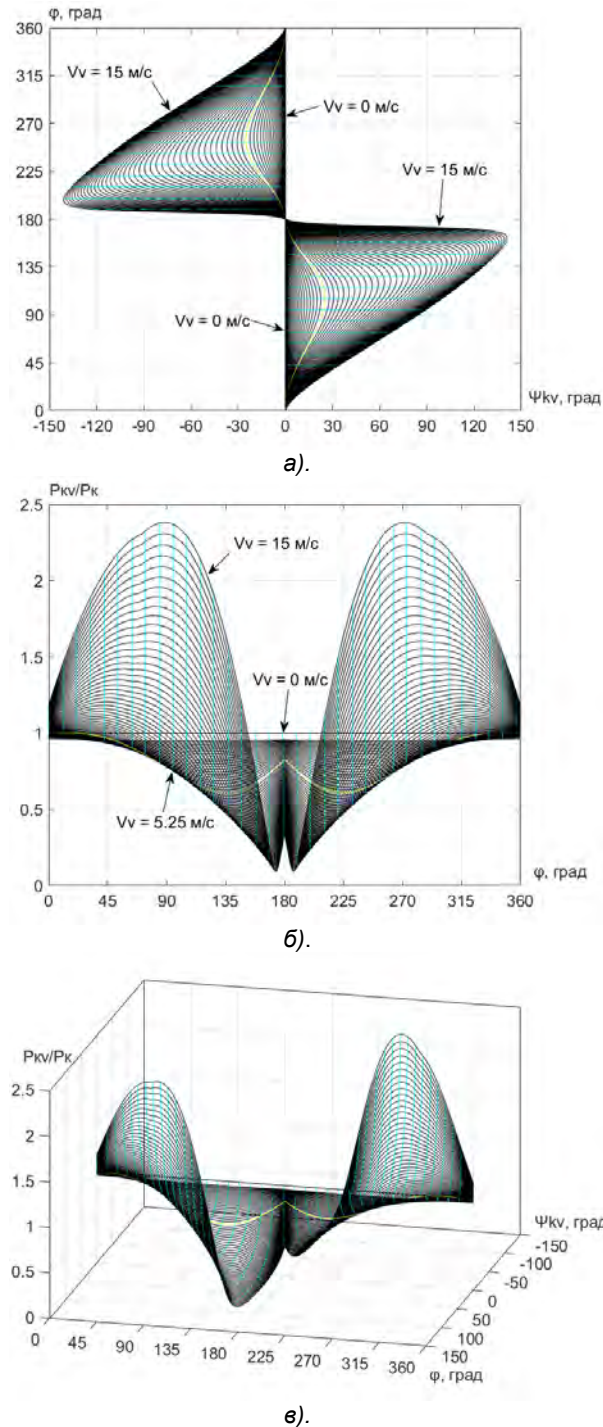


Рис. 8. Зависимость амплитуды и направления суммарного вектора сил при изменении силы и направления ветра

На рис. 8б представлены зависимости  $P_{kv}/P_k$  от направления и силы ветра. При попутном ветре со скоростью 15 м/с  $P_{kv}/P_k = 1.2$ , при встречном  $P_{kv}/P_k = 0.33$ . Очевидно, что при такой парусности судна влияние бокового ветра существенно выше. При углах  $\varphi = 90^\circ$  и  $270^\circ$  и скорости ветра 15 м/с величина суммарного вектора становится равной  $P_{kv}/P_k = 2.4$ . При тех же углах и малых скоростях ветра (от 0 до 5 м/с) величина  $P_{kv}/P_k$  может и

снижаться (кривая для  $V_v = 5.25$  м/с на рис. 8б). Такая сложная взаимосвязь определяется разной конфигурацией носовой и кормовой частей судна. Общую картину изменений величины и угла суммарного вектора сил можно видеть на 3D графике (рис. 8в).

Приведенные выше результаты указывают на сложность задачи управления судном, стоящую перед судоводителем. Как показывают результаты опытной эксплуатации первого судна с КДРК «Сура», судоводитель часто не в состоянии обеспечить высокое качество управления при независимом регулировании частот вращения гребных колес с помощью двух джойстиков. Судно с КДРК остро реагирует на изменения соотношения частот вращения колес и попытки удержать судно на курсе путем поочередного изменения частот вращения колес (что вполне логично с точки зрения судоводителя) приводят к возникновению рысканья.

Для первых трех судов с КДРК была разработана система [4,5], обеспечивающая управление двумя колесами с помощью одного джойстика, которым судоводитель задает желаемый курс судна. Второй джойстик используется для задания скорости движения. Соотношения частот вращения гребных колес, необходимые для осуществления заданных судоводителем скорости и курса, вычисляются контроллером, управляющим частотными приводами колес. В настоящее время этот алгоритм успешно используется в составе компьютеризированных систем управления на теплоходах с КДРК [6]. К недостаткам этого алгоритма можно отнести то, что формирование управляющих воздействий производится для каждого гребного колеса отдельно, что в некоторых случаях может приводить к повышению частоты отработки управляющих воздействий (т.е. увеличению механических нагрузок на приводы колес).

Для нового судна «Золотое кольцо» предлагается алгоритм управления гребными колесами, обеспечивающий движение судна по заданной траектории, в котором управляющее воздействие формируется для двух колес сразу.

Для синтеза алгоритма удержания судна на заданной траектории введем функцию  $Rul$ , учитывающую угловое отклонение судна от заданного курса, угловую скорость поворота судна и отклонение от заданной траектории движения [4]:

$$Rul = k_\alpha * (\alpha - \alpha_z) + k_\omega * \omega + k_\gamma * (\gamma - \gamma_z),$$

где  $\alpha, \alpha_z$  – текущий и заданный угол курса;  
 $\omega$  – угловая скорость судна;  
 $\gamma, \gamma_z$  – текущая и заданная траектория движения;  
 $k_\alpha, k_\omega, k_\gamma$  – коэффициенты, определяющие вклад каждого из слагаемых в общий результат.

Управляющие воздействия, обеспечивающие изменение частоты вращения гребных колес ( $n_i = U_{iнов} * n_{max}$ ) определяется как



$$U_{1нов} = \begin{cases} \begin{cases} U_{1ст}, \\ U_{ход} + |Rul|, \\ 1, \\ U_{ход}, \end{cases} & \begin{cases} U_{ход} + |Rul| \leq 1 \\ U_{ход} + |Rul| > 1' \end{cases} & \begin{cases} U_{2ст} > U_{ход} \\ U_{2ст} \leq U_{ход}' \end{cases} & \begin{cases} U_{ход} < 1 \\ U_{ход} = 1 \end{cases}, & Rul > 0 \\ \begin{cases} U_{ход}, \\ U_{1ст}, \\ U_{ход} - ((U_{ход} + |Rul|) - 1), \\ U_{ход} - |Rul|, \end{cases} & \begin{cases} U_{ход} + |Rul| \leq 1 \\ U_{ход} + |Rul| > 1' \end{cases} & \begin{cases} U_{1ст} > U_{ход} \\ U_{1ст} \leq U_{ход}' \end{cases} & \begin{cases} U_{ход} < 1 \\ U_{ход} = 1 \end{cases}, & Rul < 0 \end{cases}$$

$$U_{2нов} = \begin{cases} \begin{cases} U_{ход}, \\ U_{2ст}, \\ U_{ход} - ((U_{ход} + |Rul|) - 1), \\ U_{ход} - |Rul|, \end{cases} & \begin{cases} U_{ход} + |Rul| \leq 1 \\ U_{ход} + |Rul| > 1' \end{cases} & \begin{cases} U_{2ст} > U_{ход} \\ U_{2ст} \leq U_{ход}' \end{cases} & \begin{cases} U_{ход} < 1 \\ U_{ход} = 1 \end{cases}, & Rul > 0 \\ \begin{cases} U_{2ст}, \\ U_{ход} + |Rul|, \\ 1, \\ U_{ход}, \end{cases} & \begin{cases} U_{ход} + |Rul| \leq 1 \\ U_{ход} + |Rul| > 1' \end{cases} & \begin{cases} U_{1ст} > U_{ход} \\ U_{1ст} \leq U_{ход}' \end{cases} & \begin{cases} U_{ход} < 1 \\ U_{ход} = 1 \end{cases}, & Rul < 0 \end{cases}$$

где  $U_{1нов}$ ,  $U_{2нов}$  – новые значения управляющих воздействия для колес,  $U_{1ст}$ ,  $U_{2ст}$  – текущие значения управляющих воздействий для колес,  $U_{ход}$  – заданная ходовая скорость.

Предложенный алгоритм позволяет обеспечить приемлемые качественные показатели процесса удержания судна на заданной траектории при изменении параметров движения и параметров внешних воздействий. На рис. 9 и 10 приведены результаты моделирования работы алгоритма при скорости движения судна  $V = 4.2$  м/с (или 15.2 км/ч), при боковом ветре  $V_v = 7$  м/с (или 25.2 км/ч) и изменении положения ЦП относительно ЦМ от +14 м (смещение к корме) до -9.5 м (смещение к носу). На рис 9а отображены частоты вращения гребных колес при смещении ЦП относительно ЦМ на +14 м, на рис. 9б - траектория движения судна. Ветер возникает при  $t = 300$  с и исчезает при  $t = 600$  с. При столь большом смещении центра парусности ветер пытается развернуть судно по часовой стрелке. Для компенсации этого воздействия устанавливается максимальная частота вращения правого колеса  $n_2 = n_{max}$ , удержание на траектории осуществляется подработкой левого гребного колеса. Отклонение от заданной траектории не превышает 0.2 м, судно движется с углом дрейфа -  $2.1^\circ$ . При смещении ЦП к носу более, чем на 10 м и боковом ветре  $V_v = 7$  м/с алгоритм не обеспечивает удержание судна на траектории (следует отметить, что на практике столь большое смещение ЦП от ЦМ не наблюдается). На рис. 10 приведены результаты моделирования при смещении ЦП к носу на 9.5 м. Ветер пытается развернуть судно против часовой стрелки. Алгоритм обеспечивает удержание судна на курсе. Левое колесо компенсирует вращающий момент ветра, частота правого колеса меняется от 0 до  $n_1 = n_{max}$ . На практике такой режим неприемлем из-за значительных механических нагрузок на приводы колес.

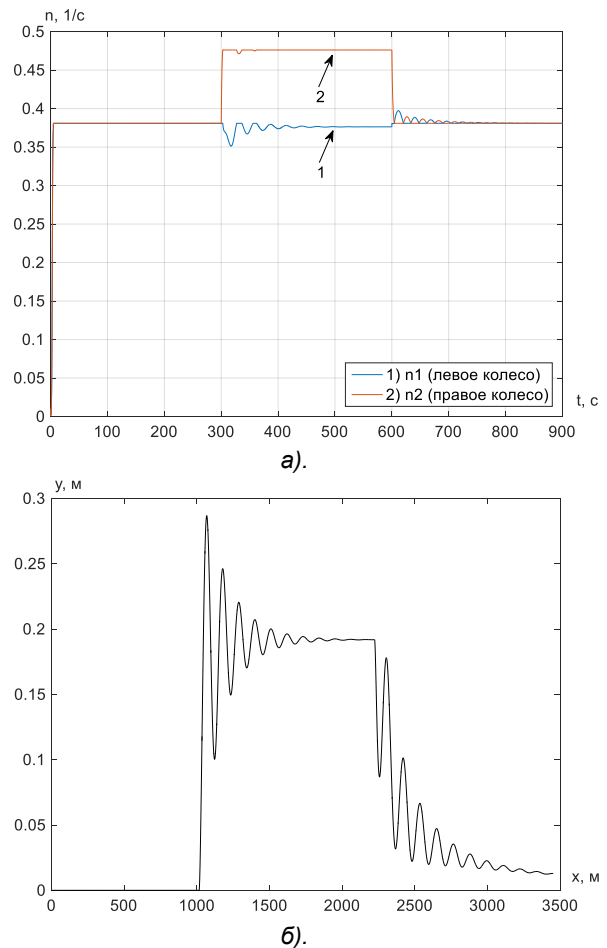


Рис. 9. Моделирование движения судна при смещении ЦП к корме на 14 м.  
 а – частота вращения гребных колес;  
 б – траектория движения судна

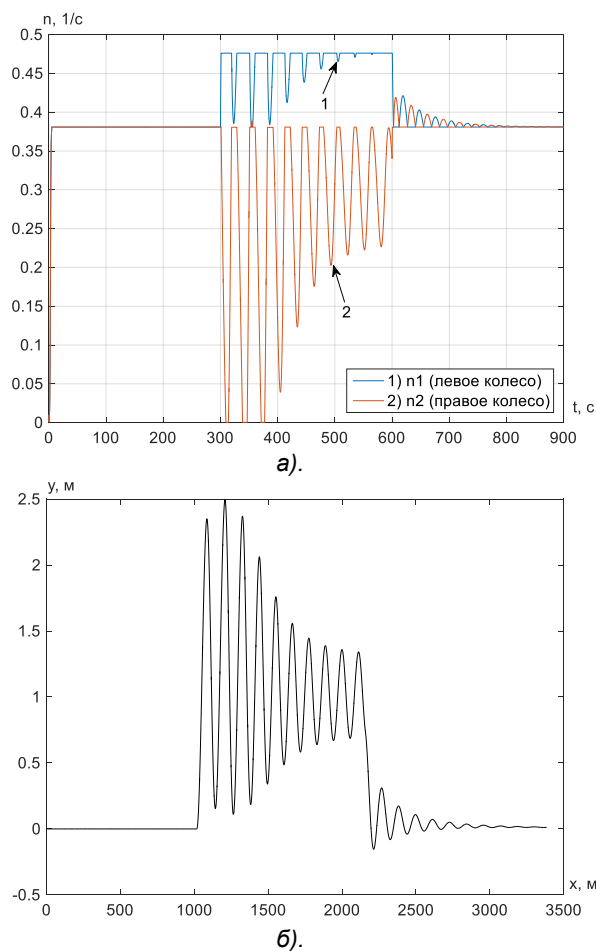


Рис. 10. Моделирование движения судна при смещении ЦГ к носу на 9,5 м.  
 а – частота вращения гребных колес;  
 б – траектория движения судна.

Приведенные результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

- конструкция судна с КДРК предопределяет его специфические динамические особенности при изменении параметров движения и параметров внешних воздействий;
- получение хороших качественных показателей при управлении судном в ручном режиме при существенных внешних воздействиях предъявляет высокие требования к профессионализму судоводителя;
- предложенный алгоритм управления позволяет получить высокое качество управления в широком диапазоне изменяющихся параметров как самого судна, так и параметров внешних воздействий.

#### Литература

1. Пат. № 2225327 Российская Федерация, МПК В63Н1/04, В63Н05/03. Колесный движительно-рулевой комплекс/ Фальмонов Е.В.; заявитель и патентообладатель Фальмонов Евгений Васильевич. № 2001132474/11; заявл. 30.11.2001; опубл. 10.03.2004, Бюл. № 7., 11 с.
2. Галкин Д. Н. и др., Уникальный туристический теплоход, или как развивать отрасль в современных условиях. Речной транспорт (XXI век), 2016. № 2 (78). С. 21-23.
3. Бычков В.Я. Грошева Л.С., Плющаев В.И. Расчет сил ветрового воздействия на корпус судна с колесно-движительным рулевым комплексом. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2018. Выпуск 55. С. 11-20.
4. Грошева Л.С., Мерзляков В.И., Плющаев В.И. Синтез алгоритма управления движением судна с колесным движительно-рулевым комплексом. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика, 2012. №2. С. 34-39.
5. Грошева Л.С., Плющаев В.И. Адаптивный алгоритм удержания судна с колесным двигателем на курсе. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск 43. Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2015. С.48-55.
6. Плющаев В.И., Галкин Д.Н., Итальянцев С.А. Компьютеризованная система управления пассажирским колесным теплоходом. Речной транспорт (XXI век), 2014. № 6(71). С. 35-37.

#### References

1. Pat. № 2225327 Rossiyskaya Federatsiya, MPK V63N1/04, V63N05/03. Kolesnyy dvizhitel'no-rulevoy kompleks/ Fal'monov E.V.; zayavitel' i patentoobladatel' Fal'monov Evgeniy Vasil'evich. № 2001132474/11; zayavl. 30.11.2001; opubl. 10.03.2004, Byul. № 7., 11 s.
2. Galkin D. N. i dr., Unikal'nyy turisticheskiy teplokhod, ili kak razvivat' otrasl' v sovremennykh usloviyakh. Rechnoy transport (XXI vek), 2016. № 2 (78). S. 21-23.
3. Bychkov V.Ya. Grosheva L.S., Plyushchaev V.I. Raschet sil vetrovogo vozdeystviya na korpus sudna s kolesno-dvizhitel'nym rulevym kompleksom. Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. N. Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2018. Vypusk 55. S. 11-20.

4. Grosheva L.S., Merzlyakov V.I., Plyushchaev V.I. Sintez algoritma upravleniya dvizheniem sudna s kolesnym dvizhitelem i rulevym kompleksom. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universitet. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika, 2012. №2. S. 34-39.
5. Grosheva L.S., Plyushchaev V.I. Adaptivnyy algoritm uderzhaniya sudna s kolesnym dvizhitelem na kurse. Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. Vypusk 43. N. Novgorod: Izd-vo FGBOU VO «VGUVT», 2015. S.48-55.
6. Plyushchaev V.I., Galkin D.N., Ital'yantsev S.A. Komp'yuterizovannaya sistema upravleniya passazhirskim kolesnym teplokhodom. Rechnoy transport (XXI vek), 2014. № 6(71). S. 35-37.

УДК 639.222.5

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЮ ПРОМЫСЛОВЫМ ФЛОТОМ ПРИ ВЕДЕНИИ ДОБЫЧИ ВОДНЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА ПРИМЕРЕ ПРОМЫСЛА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ САРДИНЫ (ИВАСИ) И СКУМБРИИ В ДАЛЬНЕВОСТОЧНОМ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОМ БАССЕЙНЕ

**Светлана Владимировна Лисиенко**

кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой Промышленного рыболовства  
Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет  
690087, Владивосток, ул. Луговая, 52 Б  
e-mail: lisenkosv@mail.ru

**Владимир Евгеньевич Вальков**

аспирант кафедры промышленного рыболовства  
Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет  
690087, Владивосток, ул. Луговая, 52 Б  
e-mail: vlvalkov@yandex.ru

**Нина Сергеевна Иванко**

аспирант кафедры промышленного рыболовства  
Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет  
690087, Владивосток, ул. Луговая, 52 Б  
e-mail: invs@mail.ru

**Анатолий Николаевич Бойцов**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Промышленного рыболовства  
Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет  
690087, Владивосток, ул. Луговая, 52 Б  
e-mail: boitsov\_an@mail.ru

### Аннотация

В работе рассматриваются вопросы совершенствования оценки эффективности рыболовства как производственного процесса, осуществляемого в условиях большой неопределенности и имеющего ярко выраженный вероятностный и стохастический характер. Авторами сформирован научно-обоснованный подход к оценке эффективности процесса ведения добычи водных биологических ресурсов и определен практико-ориентированный вектор развития производственной системы «промысел дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии» с учетом совокупности управляемых и неуправляемых факторов, ограничений и проблем, оказывающих влияние на эффективность технологического процесса ведения добычи указанных объектов промысла, т.е. на достижение высоких количественных и качественных показателей, взаимосвязанных и взаимообусловленных функционированием всей исследованной системы. Определен научно-обоснованный подход к совершенствованию организационных схем работы добывающих судов, планированию и управлению промысловым флотом, разработана математическая модель по оптимизации ведения добычи водных биологических ресурсов на примере промысла дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии на основе усовершенствованных организационных схем. Предлагается компьютерная программа для решения оптимизационной задачи со встроенным блоком расчета экономической эффективности промысловой деятельности в качестве практического инструмента для решения практико-ориентированных задач по оптимизации работы добывающего флота.

**Ключевые слова:** Промышленное рыболовство, технология добычи, дальневосточная сардина (иваси), скумбрия, рыбопромысловый флот, управление промыслом, системный анализ.

## DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL AND OPTIMIZATION PROBLEM ON ORGANIZATION AND MANAGEMENT OF THE FISHING FLEET DURING PRODUCTION OF WATER BIOLOGICAL RESOURCES ON THE EXAMPLE OF FISHERIES CASE FAR SARDINES (IWASI) AND MACKEREL IN THE FAR EAST FISHERY BASIN

**Svetlana V. Lisienko**

Candidate of Economics Sciences, Associate Professor, Head of the Chair of Industrial Fisheries Far Eastern State Technical Fisheries University 690087, Vladivostok, Lugovaya st., 52 B  
e-mail: lisenkosv@mail.ru

**Vladimir E. Valkov**

Graduate student of the Chair of Industrial Fisheries Far Eastern State Technical Fisheries University  
690087, Vladivostok, Lugovaya st., 52 B  
e-mail: vlvalkov@yandex.ru

**Nina S. Ivanko**

Graduate student of the Chair of Industrial Fisheries Far Eastern State Technical Fisheries University  
690087, Vladivostok, Lugovaya st., 52 B  
e-mail: invs@mail.ru

**Anatoly N. Boytsov**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Industrial Fisheries Far Eastern State Technical Fisheries University 690087, Vladivostok, Lugovaya st., 52 B  
e-mail: boitsov\_an@mail.ru

**Abstract**

The paper considers issues of improving the assessment of the effectiveness of fishing as a production process, carried out in conditions of great uncertainty and having a pronounced probabilistic and stochastic nature. The authors formed a scientifically-based approach to assessing the effectiveness of the process of extracting aquatic biological resources and determined a practice-oriented vector for the development of the production system “fishing for the Far Eastern sardine (Iwasi) and mackerel”, taking into account the totality of controlled and uncontrolled factors, limitations and problems that affect efficiency the technological process of mining the specified objects of fishing, i.e. to achieve high quantitative and qualitative indicators, interrelated and interdependent by the functioning of the entire investigated system. A scientifically-based approach to improving the organizational schemes of operation of production vessels, planning and management of the fishing fleet was determined, a mathematical model was developed to optimize the production of aquatic biological resources using the example of fishing for the Far Eastern sardine (Iwashi) and mackerel based on improved organizational schemes. A computer program is proposed for solving an optimization problem with a built-in unit for calculating the economic efficiency of fishing activities as a practical tool for solving practice-oriented tasks to optimize the operation of the mining fleet.

**Key words:** Industrial fisheries, mining technology, Far Eastern sardine (Iwasi), mackerel, fishing fleet, fishery management, system analysis.

**Введение**

Вопросы оценки эффективности рыболовства как производственного процесса, осуществляемого в условиях большой неопределенности и имеющего ярко выраженный вероятностный и стохастический характер, лежат в плоскости разработки обобщенной теории промышленного рыболовства, рассматривающей функционирование рыболовных процессов системно, в контексте совершенствования организационных схем работы добывающих судов, планирования и управления промысловым флотом [1]. На его ход оказывает влияние большое количество как управляемых, так и неуправляемых факторов. Первые являются полностью восприимчивыми и эластичными к применяемым к системе «добыча» управляющим воздействиям, вторые, влияние которых для названной системы является в большинстве случаев определяющим, слабореагируемы или нереагируемы в целом [2].

Технология тралового промысла дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии, как и любая технология промысла, является системой взаимосвязанных и взаимообусловленных компонентов: объект промысла (его поведение в естественных условиях и в зоне действия орудия рыболовства), гидрометеорологические условия района промысла, орудие рыболовства, промысловые схемы, представляющие собой взаимосвязанную совокупность промыслового судна с установленным на нем промысловым устройством для ведения процессов добычи, организация ведения промысла.

Организация тралового промысла зависит от характеристики района промысла, его удаленности от береговых баз, типа судна, вида тралового лова, характеристик объекта промысла.

Формирование и функционирование системы «промысел дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии» (далее – «промысел»). формируется тремя основными компонентами:

- состав объектов промысла в «промысловом соседстве», рассматриваемый с учетом их биологических характеристик, сезонного распределения по промысловой подзоне – «Тихоокеанская» промысловой зоны 04 - Южно-Курильская, динамики численности в долгосрочной и краткосрочной перспективе, промысловой доступности;

- географическое расположение промыслового района с учетом его гидрометеорологической и гидрологической характеристик;

- количественный и качественный состав рыбопромыслового флота, включающие его вооруженность под заданную технологию добычи водных биологических ресурсов [3].

При решении комплексной задачи по системной организации промысла дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии с целью совершенствования организационных схем работы добывающих судов названные компоненты объединяются в систему нового качества – систему «промысел» [3]. Основной целью новой системы является возрастание эффективности деятельности в результате соединения, интеграции, слияния отдельных компонентов в единую систему за счет так называемого системного (синергетического) эффекта (эмерджентности) с учетом практико-ориентированного вектора дальнейшего развития в условиях реального промысла [4].

В современном отечественном рыболовстве при организации работы промыслового флота применяется два понятия промысловой экспедиции: организация рыболовства по району промысла и организация рыболовства по объекту промысла, которые отличаются друг от друга

биологическим состоянием объектов промысла и их распределением по промысловым районам по сезонам года. В этом смысле организация рыболовства по району промысла предполагает формирование сообщества добывающих судов для ведения одного промыслового объекта в разных промысловых зонах. Организация рыболовства по объекту промысла осуществляется преимущественно для объектов, биологическое состояние которых обладает промысловой доступностью и позволяет осуществлять их промышленное изъятие в определенное время.

**1. Постановка задачи оптимизации управления промыслом**

Выбор организационной схемы работы промыслового флота в промысловой экспедиции, организованной по типу – промысловая экспедиция по объекту промысла, в основе которой лежит выбор его оптимальной формы организации, создает основу для последующей разработки схем управления им в созданной системе «промысел дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии», представляющей собой единую финансово-технологическую цепочку «добыча-переработка-транспорт-выгрузка на берегу».

В названной системе каждое отдельное звено представляет собой одноименную подсистему, состояние и функционирование которой непосредственным образом влияет как на работу последующего и предыдущего звена в отдельности, так и на работу всей системы в целом. Модель управления такой системой представлена на рис.1.

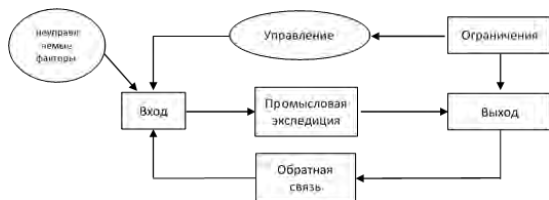


Рис. 1 Модель управления промыслом

В системе «промысел дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии», являющейся сложной динамической системой, объединяющей внутренние и внешние связи и свойствами и находящейся в постоянном взаимодействии с внешними факторами, происходит процесс добычи водных биоресурсов промысловым флотом. Данный процесс является процессом движения информационных, материальных и финансовых потоков, непосредственно связанных с производством. Следовательно, названную индустриальную систему можно охарактеризовать единую материалопроводящую систему, основным производственным процессом является вылов рыбы-сырца, выпуск из нее готовой продукции или полуфабриката. Функционирование такой системы затрачивает материальные, человеческие и технические ресурсы. Их совокупность и взаимодействие приводит к определенному результату производственной деятельности, выражаемому количественными показателями – объемами вылова и выпуска готовой продукции

или полуфабриката, который является желаемым результатом промысловой деятельности [5].

Исключительное место и роль в представленной модели управления системой «промысел дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии» занимает и играет блок «обратная связь», посредством которого осуществляется сравнение результатов блока «выход» с его моделью и определяются различия между ожидаемыми и фактическими результатами, происходит оценивание содержания и сути различий, а также «вмешательство» в происходящий процесс путем воздействия на вход системы с целью сближения фактического и ожидаемого выхода и получения результата – решения возникшей проблемы.

Отличительной чертой любого научного метода является эксперимент, который можно воспроизвести столько раз, сколько необходимо. При исследовании и оптимизации промысловых систем, например, система «промысел дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии» не может подвергнуться эксперименту хотя бы потому, что воспроизвести неоднократно и в точности повторяющиеся условия ведения добычи невозможно. Это представляется возможным только на уровне входящих в нее подсистем. На этом основании особую необходимость имеет методика исследования, связанная не с проведением эксперимента, а изучением объекта на моделях. Операционные модели просты по структуре и обычно представляют собой некоторый набор функциональных зависимостей и неравенств следующего вида:

$$U = f(X_i, Y_j), \tag{1}$$

$$A_{i,j} \leq \varphi(X_i, Y_j) \leq B_{i,j}, \tag{2}$$

Выражение (1) называется целевой функцией, или функцией цели. Неравенства (2) показывают, что управляемые переменные могут изменяться в определенных пределах.

Множество управляемых переменных всегда подчинено неравенствам вида

$$X_i \geq 0 \tag{3}$$

так как управляемые переменные есть физические величины.

В общей операционной модели промысла целевой функцией могут быть, например, рентабельности или прибыль. Множество  $X_i$  может представлять собой суда, районы промысла, запасы топлива и т.д. Множество  $Y_j$  - рыбные скопления и их распределения по районам промысла, расстояния между районами промысла, тактико-технические характеристики промысловых судов, гидрометеосостояния районов промысла и др.

Составные части предлагаемого операционного проекта, как результата исследования системы «промысел дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии» методами математического моделирования, включают в себя следующие этапы: постановку задачи, выбор критерия (критериев) эффективности, создание модели, отыскание и оценку решения на экспериментах с моделью, его внедрение. Учитывая взаимосвязанность и взаимообусловленность процессов в исследуемой системе, его процесс характеризуется одновременностью выполнения как последовательных, так и параллельных этапов.

После составления модели определяется оптимальный набор управляемых переменных с помощью математических формул, далее наступает этап внедрения полученных оптимальных решений и осуществляется контроль их правильности.

В общем виде содержательная постановка задачи выглядит следующим образом. На промысле дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии в одном районе промысла работает группа добывающих судов, каждое из которых можно отнести к одному конкретному типу судна. Всего рассматривается семь типов судов: РТМС, БМРТ (МРКТ, БАТМ), РТМС, СРТ, СРТМ.

На всех судах используется траловая технология добычи и могут быть использованы как экспедиционная, так и автономная схемы работы.

## 2. Алгоритм и методики

Для оценки эффективности использования каждого из типов добывающих судов необходимо оптимизировать количество используемых судов для добычи дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии таким образом, чтобы получить максимальное значение по выбранным критериям с заданными ограничениями. Для этого необходимо ввести  $SC$  – выбранный критерий оптимизации. Тогда если  $x_i$  это количество судов используемых на промысле дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии, то получаем формальный критерий оптимальности использования судов:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M SC_{ij} x_i \rightarrow \max \quad (4)$$

где:

в качестве  $SC_{ij}$  может быть рассмотрен любой экономический показатель.

Поставленная задача имеет следующие ограничения:

$x_i \leq n_i$  - количество судов типа  $i$  не может превосходить допустимое значение имеющихся в наличии судов, а общий объем выловленной рыбы всеми судами ограничен величиной  $A$ ,

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i x_i \leq A \quad (5)$$

где:

$\alpha_i$  - объем добычи дальневосточной сардины (иваси) из общего объема добычи каждого типа судна;

$x_i \geq 0$  - количество добывающих судов число целое и неотрицательное.

Таким образом, получается задача следующего вида:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M SC_{ij} x_i \rightarrow \max \\ x_i \leq n_i, i = 1 \dots N \\ \sum_{i=1}^N \alpha_i x_i \leq A \\ x_i \geq 0 - \text{целое}, i = 1 \dots N \end{cases} \quad (6)$$

Ограничения по количеству судов обычно не считаются как ограничения, а считаются дополнительными условиями на значения переменных, но в данном случае представлен упрощенный вариант задачи, где многие условия не то чтоб проигнорированы, а на данном этапе расчетов упрощены.

Если предприятие обладает ресурсами для расширения добывающего флота, то модификацию задачи можно представить в следующем виде:

Пусть  $\xi_i$  - количество вновь приобретаемых судов типа  $i$ . Тогда критерий оптимальности принимает вид

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M SC_{ij} x_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M SC_{ij} \xi_i \rightarrow \max \quad (7)$$

Поставленная задача имеет следующие ограничения:

$x_i \leq n_i + \xi_i$  - количество судов типа  $i$  не может превосходить допустимое значение имеющихся в наличии судов с учетом вновь приобретаемых судов, но так как число вновь приобретаемых судов неизвестно данное ограничение можно записать в виде  $x_i - \xi_i \leq n_i$ , а общий объем выловленной рыбы всеми судами, в том числе и новыми, ограничен величиной  $A$ ,

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i (x_i + \xi_i) \leq A \quad (8)$$

где:

$\alpha_i$  - объем добычи дальневосточной сардины (иваси) из общего объема добычи каждого типа судна,

$x_i \geq 0$  - количество добывающих судов число целое и неотрицательное;

$\xi_i \geq 0$  - количество новых добывающих судов число целое и неотрицательное.

Таким образом, получается задача следующего вида:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M SC_{ij} (x_i + \xi_i) \rightarrow \max$$

$$\begin{cases} x_i - \xi_i \leq n_i, i = 1 \dots N \\ \sum_{i=1}^N \alpha_i (x_i + \xi_i) \leq A \\ x_i \geq 0 - \text{целое}, i = 1 \dots N \\ \xi_i \geq 0 - \text{целое}, i = 1 \dots N \end{cases} \quad (9)$$

При проведении процесса моделирования и оптимизации происходит постоянная проверка критерия эффективности на критичность по отношению к управляемым переменным. В случае получения модели, удовлетворяющей выбранному критерию эффективности, делается вывод о конечности полученного решения для данной оптимизационной задачи. В случае, когда полученная модель не удовлетворяет условию получения прибыли, исследователем делается вывод о промежуточности данного решения и предпринимаются попытки по построению новых моделей путем воздействия на управляемые переменные с учетом интервала их изменяемости [5]. Построение новых моделей ведется до тех пор, пока не будет получено решение, соответствующие выбранному критерию оптимальности и условию  $\Pi'(x) \geq \Pi(x)$ . В случае получения модели, удовлетворяющей условию критерия эффективности и условию  $\Pi'(x) \geq \Pi(x)$ , делается вывод о завершении процесса моделирования и о дальнейшей рекомендации к внедрению данной оптимизационной модели.

Предложенная оптимизационная модель решения задачи управления добывающим флотом на промысле дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии на основе применение метода ИСО имеет практико-ориентированный вектор применения к вопросам совершенствования организации и управления производственными мощностями в системе «промысел дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии». Схема построения оптимизационной задачи представлена на рис. 2.

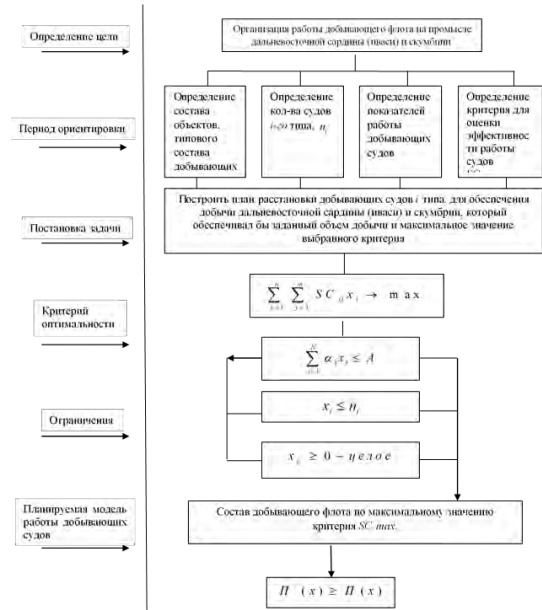


Рис. 2 Схема построения оптимизационной задачи



### 3. Результаты совершенствования организации управления промыслом

Результатом проведенных теоретических и практических исследований по совершенствованию организации, планирование и управления промысловым флотом на добыче дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии, процесса составления оптимизационной задачи по расстановке добывающего флота в заданных условиях промысла стала созданная компьютерная программа «Моделирование процессов и систем по организации, планированию и управлению промысловым флотом» как практико-ориентированный инструмент для проведения соответствующих расчетов: для расчета экономической эффективности ведения промысла водных биологических ресурсов с выбором организационных схем работы, оптимизации планирования и управления добывающим судном и группой добывающих судов в заданных промысловых условиях на основе моделирования процессов и систем организации, планирования и управления промысловым флотом. На основании расчетов экономической эффективности добывающих судов, в рамках технологического процесса, программа позволяет рассчитать оптимальный состав флота для достижения указанного объема добычи.

Программа позволяет задать режим работы судна экспедиционный или автономный. По умолчанию устанавливается автономный режим



Рис. 4 Ввод значений для судна типа РТМК-С

В базу программы занесены нормативно-технические параметры добывающих судов, соответствующие справочным данным, в окне программы обозначены голубым цветом. На вводимые пользователем значения накладываются ограничения, соответствующие нормативом по каждому параметру. Этими ограничениями являются - нормы расхода эксплуатационных запасов в порту, на переходе, на промысле, а также стоимость этих запасов;

-технико-эксплуатационные характеристики судна, влияющие на его эксплуатационный период, в т.ч. вместимость трюмов для рыбопродукции.

Для определения критериев эффективности необходимо, в первую очередь, дать их классификационные характеристики. Предлагается ввести в программу следующие классификационные группы критериев: эксплуатационные; экономические; организационные [6].

работы. После выбора схемы работы судна, открывается раздел (вкладка) по выбору состава промыслового флота (выбор производится по типу и количеству судов), используемых на промысле (рис. 3). Для каждого имеющегося типа судна необходимо указать количество судов в наличии. Как только количество судов устанавливается в любое значение больше 0 открывается вкладка для расчета по данному типу судна. Если позже уменьшить количество судов до 0, вкладка с параметрами судна перестанет быть видимой.

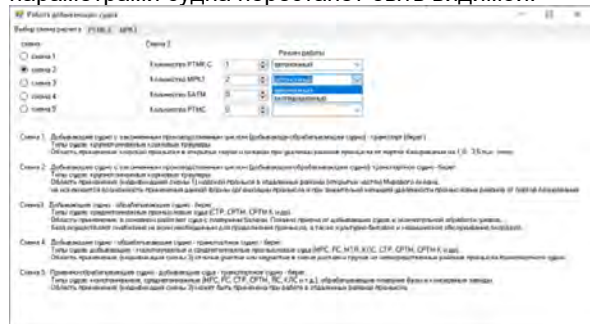


Рис. 3 Выбор состава промыслового флота

В зависимости от выбранного режима работы (автономный или экспедиционный) часть данных будет недоступна для ввода. Пример вида окна при вводе параметров для судна, работающего по автономной форме организации промысла (автономный режим) представлен на рисунке 4.

Эксплуатационные критерии определены технико-эксплуатационными характеристиками судна.

Экономическая группа критериев включает критерии эффективности, направленные на максимальный финансовый результат равный сумме произведений выбранного показателя на количество судов, и экономическая эффективность работы добывающего судна оценка которой проходит по рентабельности производства (промысла), полной рентабельности которая рассчитывается для каждого вида судна.

Группа организационных критериев включает целевые функции оптимизационных задач организации производственной системы «промысел», нормативы МОТ и комплектования экипажей морских судов и др. Задача моделирования системы управления промыслом заключается в системном упорядочении этих критериев и разработке методики их применения в промысловых подсистемах [6].

После ввода всех необходимых значений выполняется расчет. Для этого требуется нажать кнопку «выполнить расчет для...». После выполнения расчета автоматически открывается вкладка «Расчетные параметры», на которой отображены результаты расчета по каждому из выбранных судов.

При выполнении расчета для всех выбранных судов имеется возможность решения двух оптимизационных задач:

- выбор из имеющихся в наличии судов оптимального набора для получения заданного объема добычи рыбы;

- расширение флота путем увеличения числа используемых судов для получения оптимального (наилучшего) результата.

Результат оптимизации первой задачи – план расстановки добывающих судов по типам и количеству для получения оптимального, с точки зрения выбранного критерия, результата, а также с учетом имеющихся на данном виде промысла промысловых усилий.

Результат оптимизации второй задачи – план расстановки промысловых судов для получения оптимального, с точки зрения выбранного критерия, результата с учетом дополнительного введения выбранных «оптимальных» добывающих судов для достижения запланированного объема вылова дальневосточной сардины (иваси) в долгосрочной перспективе развития названного промысла (Рис. 6).

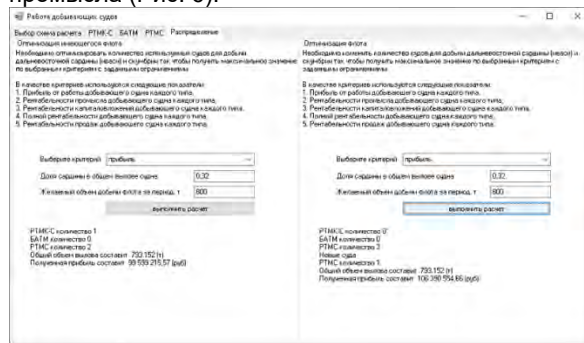


Рис. 6 Результаты оптимизации промыслового флота с учетом введения дополнительных промысловых единиц

### Заключение

Таким образом, системный подход к исследованию производственной системы «промысел» можно представить, как комплекс инструментов, позволяющих описать свойства системы ее структуру и значение, а также происходящие в ней процессы в целом. Такой подход позволяет представить их в качестве структуры со сложными межкомпонентными взаимосвязями, взаимовлиянием компонентов системы на среду, а также влиянием самой системы на ее структурные компоненты для достижения основной цели функционирования производственной системы. Особенностью

системного подхода к производственной системе «промысел» является оптимизация жизнедеятельности всей системы в целом, как системы, состоящей из последовательно структурированных и функционально объединённых элементов системы, состоящей из отдельных обособленных подсистем, а не только ее отдельных элементов.

Целостное видение исследуемого объекта, а также его процессов, на котором базируется системный подход, является наиболее функциональным методом исследования и анализа сложной производственной системы «промысел». Применение системного подхода к исследованию производственной системы "промысел" является научной основой совершенствования организации ведения добычи водных биологических ресурсов и управления промысловым флотом.

На решение задачи по совершенствованию организации и управления промысловым флотом, работающим на добыче дальневосточной сардины (иваси) и скумбрии, направлена созданная компьютерная программа «Моделирование процессов и систем по организации, планированию и управлению промысловым флотом». Данная программа на основе моделирования процессов и систем организации, планирования и управления промысловым флотом является практико-ориентированным инструментом для расчета экономической эффективности ведения промысла водных биологических ресурсов с выбором организационных схем работы, оптимизации планирования и управления добывающим судном и группой добывающих судов в заданных промысловых условиях.

Разработанная программа направлена на использование в учебном процессе при подготовке профильных специалистов в области промышленного рыболовства в рамках образовательных программ уровней бакалавриата, магистратуры и подготовки кадров высшей квалификации – программам аспирантуры, для практического использования в рыбодобывающих и рыбохозяйственных организациях в процессе решения практико-ориентированных задач по управлению промысловым флотом. Программа обладает кроссплатформенностью для работы под управлением Windows и систем семейства Linux.

### Литература

1. Андреев М. Н., Студенецкий С. А. Оптимальное управление на промысле. – М.: Пищевая промышленность, 1975. – 288 с.
2. Лисиенко С. В. Совершенствование организации ведения добычи водных биологических ресурсов с целью успешной реализации стратегического развития отечественного рыболовства// Рыбное хозяйство, № 3, 2013 г. с. 17-21.
3. Лисиенко С. В. Системный подход к исследованию индустриальной логистической системы «промысловая зона» - научная основа совершенствования организации ведения добычи водных биологических ресурсов// Рыбное хозяйство, № 5, 2016 г. с. 40-43.
4. Бойцов А.Н., Осипов Е.В., Лисиенко С.В., Вальков В.Е. Разработка модели управления траловой системой с гибкими распорными устройствами. Научно-практические вопросы регулирования рыболовства: материалы нац. науч.-техн. конф. – Владивосток : Дальрыбвтуз, 2019. с. 9-12.
5. Мизюркин М. А., Лисиенко С. В., Гоголина Л. В. Рыбозаводы Приморья: организационные, управленческие, производственные проблемы в контексте современной теории и практики. Монография. – Владивосток.: Дальрыбвтуз, 2001. – 106 с.
6. Мойсеенко С.С., Мейлер Л.Е. Рыбопромышленная логистика. Монография/ С.С. Мойсеенко, Л.Е. Мейлер. Калининград. Изд-во БГАРФ, 2015. - 174 с.

#### References

1. Andreev M. N., Studenetsky S. A. Optimal management in the field. - M.: Food industry, 1975. - 288 p.
2. Lisienko S. V. Improving the organization of the extraction of aquatic biological resources for the successful implementation of the strategic development of domestic fisheries // Fisheries, No. 3, 2013 p. 17-21.
3. Lisienko S. V. A systematic approach to the study of the industrial logistic system "fishing zone" - the scientific basis for improving the organization of production of aquatic biological resources // Fisheries, No. 5, 2016 p. 40-43.
4. Boytsov AN, Osipov EV, Lisienko SV, Valkov V.E. Development of a trawl system control model with flexible spacers. Scientific and practical issues of fisheries regulation: materials nat. scientific and technical conf. - Vladivostok: Dalrybvtuz, 2019.S. 9-12.
5. Mizyurkin M.A., Lisienko S.V., Gogolina L.V. Primorye fish factories: organizational, managerial, production problems in the context of modern theory and practice. Monograph. - Vladivostok.: Dalrybvtuz, 2001. -- 106 p.
6. Mojseenko S.S., Mejler L.E. Rybopromyshlennaya logistika. Monografiya. S.S. Mojseenko, L.E. Mejler. Kaliningrad. Izd-vo BGARF, 2015. - 174 p.

## УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 656.62: 504.4.054

### ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВОДНОГО ТУРИЗМА

**Валерий Иванович Решняк**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химии и экологии  
Санкт-Петербургский государственный университет морского и речного флота имени адмирала  
С.О. Макарова  
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: RV53@mail.ru

**Ольга Леонидовна Домнина**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры логистики и маркетинга  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: o-domnina@yandex.rul.ru

**Андрей Евгеньевич Пластинин**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: plastininae@yandex.ru

**Николай Станиславович Отделкин**

доктор технических наук, профессор кафедры прикладной механики и  
подъемно-транспортных механизмов  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова 5  
e-mail: nauka@vgavt-nn.ru

#### Аннотация

В статье представлен системный взгляд на организацию обеспечения экологической безопасности водного туризма. Установлены основные факторы, которые необходимо учитывать при формировании отрицательного влияния водного туризма на водные объекты, и роль этих факторов. Разработана последовательность операций, выполнение которых необходимо для обеспечения экологической безопасности туристических мероприятий. Предложено при разработке каждого туристического проекта формировать его экологическое обеспечение в виде комплекса природоохранных организационных мероприятий и технических средств. Определены основные направления природоохранных организационных мероприятий при подготовке экологического обеспечения туристического проекта.

В статье также предложена математическая модель оценки экологического риска в сфере водного туризма. учитывает как транспортные происшествия с участием туристического флота, так несанкционированный сброс отходов членами экипажа.

В дальнейшем предполагается апробация предложенной модели и анализ полученных результатов.

**Ключевые слова:** аварийное загрязнение; экологический риск; экологическая безопасность; экологический ущерб; водный туризм.

### ECOLOGICAL SUPPORT OF WATER TOURISM

**Valery I. Reshnyak**

the professor, Dr.Sci.Tech.,  
the head of the Department of the chemical and ecology,  
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
Dvinskajya, 5/7, St. Petersburg 199035, Russian Federation  
e-mail: RV53@mail.ru

**Olga L. Domnina**

Associate Professor, Ph.D in Engineering Science,  
Associate Professor of the Department of Logistics and Marketing  
Volga State University of Water Transport,  
Nesterova St., 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation  
e-mail: o-domnina@yandex.rul.ru

**Andrey E. Plastinin**

Associate Professor, Dr.Sci.Tech  
Professor of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety  
Volga State University of Water Transport,  
Nesterova St., 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation  
e-mail: plastininae@yandex.ru

**Nikolai St. Otdelkin**

the professor, Dr.Sci.Tech  
 Professor of applied mechanics and lifting and transport mechanisms  
 Volga state University of water transport  
 603950, Nizhny Novgorod, Nesterov str. 5  
 e-mail: nauka@vgavt-nn.ru

**Abstract**

The article presents a systematic look at the organization of environmental safety support of water tourism. The main factors that must be considered when forming the negative impact of water tourism on water bodies, and the role of these factors are established. A sequence of operations which implementation is necessary to support the environmental safety of tourism events has been developed. It has been proposed to form environmental support in the form of a complex of environmental organizational measures and technical means during the development of each tourism project. The main directions of environmental organizational measures in the preparation of the environmental support of the tourism project are determined.

The article also suggests a mathematical model for assessing environmental risk in the field of water tourism considering accidents involving the tourism fleet as well as unauthorized waste dumping by crew members.

The further testing of the suggested model and analyzing of the received results are supposed.

**Keywords:** accidental pollution; environmental risk; environmental safety; environmental damage; water tourism.

**Введение**

Одной из основных сфер экономической деятельности страны является туризм. Для России – страны богатой водными ресурсами, большое значение имеет водный туризм, который постоянно развивается, расширяя свое многообразие. В настоящее время водный туризм имеет такие виды, как речные круизы длительностью от 3 до 20 дней, индивидуальные речные путешествия на маломерных судах, городские экскурсии по водным объектам городов и некоторые другие. Например, туристические проекты, предусматривающие стационарный отдых на водном объекте с проживанием туристов на плавучих гостиницах.

Логистика реализации водного туризма может влиять на решение проблем обеспечения экологической безопасности водного туризма.

Неотъемлемым элементом, обеспечивающим любой вид водного туризма, является средства водного транспорта. Их главным назначением является обеспечение жизнедеятельности людей и их перемещение.

Наличие человека, не зависимо от вида и времени пребывания на судне, является основным фактором формирования отрицательного влияния туристического проекта на окружающую среду. Кроме того, и сами суда, не зависимо назначения, тоннажности и пассажироместности, как средства водного транспорта являются источниками загрязнения окружающей среды.

Разнообразие содержания туристических мероприятий, а также количество участников и их длительность, определяют свои особенности отрицательного влияния разных видов водного туризма на окружающую среду. Условия реализации защитных мер также, как правило, могут отличаться не только для разных видов водного туризма, но и для разных туристических проектов. Сказанное означает, что реализация любого туристического проекта должна сопровождаться экологическим обеспечением, которое представляет собой комплекс природоохранных организационных мероприятий и технических средств.

В Законе о туристической деятельности охрана окружающей среды названа одной из основных целей туризма [1], что наряду с возрастающим в обществе уровнем экологического сознания, является основанием для исследований в данной области [2].

В области эксплуатации объектов водного транспорта существуют природоохранные требования, которые направлены на защиту окружающей среды и, прежде всего, водных ресурсов страны.

Анализ упомянутых требований показывает, что в целом их удовлетворение обеспечивается комплексом технических средств в результате осуществления определенных организационных мероприятий [3]. Учитывая, что конкретный характер требований, эксплуатационная ситуация, тип и назначение средств водного туризма на разных участках водных путей при реализации туристических проектов могут быть разными, на практике возникает необходимость обоснованного выбора такого природоохранного комплекса.

Цель нашего исследования: разработка подходов к обоснованию экологического обеспечения в сфере водного туризма, учитывающей специфику транспортных происшествий в сфере туризма, процессы возникновения и развития экологических последствий.

Для реализации указанной цели нами были поставлены следующие задачи:

- предложить основные этапы разработки экологического обеспечения туристического мероприятия;
- выявить факторы, определяющие технологию перемещения загрязнений;
- разработка математической модели и комплексной методики оценки экологического риска ТП в сфере водного туризма.

### 1. Основные этапы разработки экологического обеспечения туристического мероприятия

Разработка экологического обеспечения любого экологического проекта включает в себя следующие этапы (рис. 1):

- анализ содержания туристического мероприятия;
- анализ состава загрязнений;
- анализ природоохранных требований;
- анализ навигационных условий;
- формирование природоохранного комплекса организационных мероприятий и технических средств.

Анализ содержания туристического мероприятия позволяет определить:

- длительность мероприятия и количество туристов и обслуживающего персонала;
- характер жизнедеятельности людей во время туристического мероприятия;
- сформировать информацию, необходимую для анализа состава и количества загрязнений, образующихся при реализации рассматриваемого мероприятия;
- навигационные условия в районе реализации туристического мероприятия, в том числе наличие природоохранной инфраструктуры.

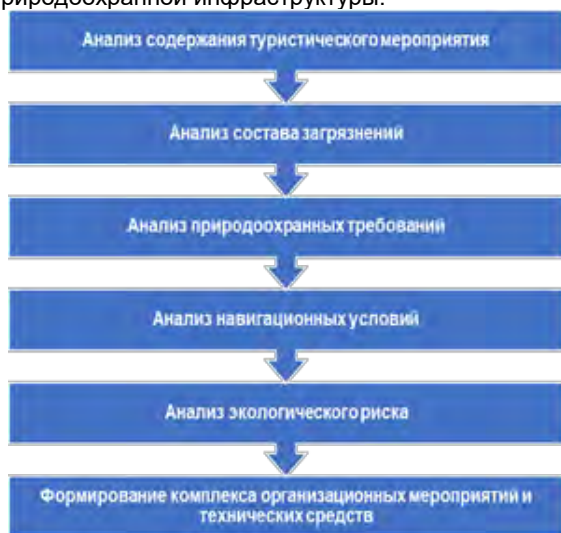


Рис. 1. Основные этапы разработки экологического обеспечения туристического мероприятия

Кроме того, анализ содержания туристического проекта, например, в части туристического маршрута, необходим при организации применения природоохранных технических средств, которая включает в себя принятие решений о расстановке технических средств в районе пролегания туристического маршрута.

Анализ природоохранных требований является наиболее важным фактором, определяющим параметры природоохранных технических средств, например, степень очистки сточной воды, которая должна обеспечиваться очистными системами.

Анализ навигационных условий необходим для определения мест расстановки природоохранных технических средств на обслуживаемом районе водных путей. Такая задача описана в работе [3,4]. Ее решение преследует следующие основные цели:

- обеспечение навигационной безопасности средств водного транспорта при передаче загрязнений на средства внесудовой их переработки;
- обеспечение эффективного функционирования технологии перемещение загрязнений;
- оптимизация расстановки природоохранных технических средств на участке водных путей.

### 2. Факторы, определяющие технологию перемещения загрязнений

Предотвращение загрязнения окружающей среды при реализации мероприятий водного туризма в целом представляет собой процесс перемещения загрязнений, который включает в себя их накопление и временное хранение, транспортировку, переработку и водоотведение очищенной сточной воды и утилизацию отходов. Другими словами, такой процесс представляет собой технологию перемещения загрязнений. Опыт исследований в области защиты окружающей среды на водном транспорте [5,6] позволяет утверждать, что такая технология зависит от следующих факторов (см. рис.2):

- природоохранных требований;
- состава и свойств образующихся загрязнений;
- навигационных условий в районе реализации туристического мероприятия.

Природоохранные требования определяют условия водоотведения в районе реализации туристического мероприятия, в том числе – качество очистки сточной воды, а также условия временного хранения и передачи на утилизацию отходов. Учитывая, что технология очистки воды, определяется требованиями к качеству очищенной воды, а сами требования могут отличаться для разных районов водных путей, такой подход позволяет использовать технические средства, которые обеспечат удовлетворение природоохранных требований.

При формировании комплекса природоохранных технических средств необходимо учесть возможность использования таких средств в совместной аренде с другими заинтересованными сторонами, например, судовладельческими компаниями.



Рис. 2. Факторы, определяющие технологию перемещения загрязнений

В целом существует две стратегии применения природоохранного оборудования при эксплуатации объектов водного транспорта – использование судового оборудования, а также комплекса внесудовых технических средств [5]. Выбор стратегии определяется для каждого туристического проекта с учетом природоохранных требований в районе реализации проекта, содержания проекта и технических характеристик используемых средств водного транспорта.

**3. Математическая модель и комплексная методика оценки экологического риска в сфере водного туризма**

Математическая модель оценки экологического риска в сфере водного туризма является продолжением разработок в сфере оценки риска на объектах водного транспорта [6] и основывается на следующих утверждениях:

1) нанесение вреда окружающей среде (экологический убыток) может произойти по следующим причинам: при транспортном происшествии (ТП) с участием туристического судна и при несанкционированном сбросе судовых жидких и твердых отходов членами экипажа.

2) Вероятность и тяжесть экологических последствий зависят от типа пассажирского судна, характеристик водного объекта, наличия пунктов сдачи судовых отходов в районе плавания и наличия в прошлом у команды зафиксированных фактов несанкционированного сброса отходов у командного состава туристического флота.

3) Основными источниками причинения вреда окружающей среде (экологических убытков) при эксплуатации туристического флота являются:

- нефть (топливо и нефтесодержащие воды);
- хозяйственно-бытовые сточные воды;
- мусор с судов;
- части судна при его затоплении в результате аварии.

При этом все эти источники будут учитываться при наличии транспортного происшествия с участием туристического судна. Несанкционированные сбросы отходов характерны для следующих источников причинения вреда: хозяйственно-бытовые сточные воды; мусор и нефтесодержащие воды.

Ожидаемый экологический ущерб ( $R_{\text{э}}$ ) будет определяться по формуле:

$$R_{\text{э}} = R_{\text{ТП}} + R_{\text{НС}}, \tag{1}$$

где  $R_{\text{ТП}}$  - ожидаемый экологический ущерб от транспортного происшествия с туристическим судном;

$R_{\text{НС}}$  - ожидаемый экологический ущерб от несанкционированных сбросов отходов с судов;

При этом ожидаемый экологический ущерб при ТП будет определяться по следующей формуле:

$$R_{\text{ТП}} = \sum_{j=1}^L R_{\text{ЭРТП}j}^{\text{УК}} \tag{2}$$

где  $R_{\text{ЭРТП}j}^{\text{УК}}$  – ожидаемый экологический ущерб от ТП на  $j$ -ом участке концентрации происшествий, млн. руб./год;

$L$  – количество участков концентрации происшествий.

Так как вероятность причинения экологического вреда в результате ТП зависит от того, какие типы пассажирских судов эксплуатируются на определенном участке, то экологический риск на участке концентрации  $R_{\text{ЭРТП}j}^{\text{УК}}$  можно определить по формуле:

$$R_{\text{ЭРТП}j}^{\text{УК}} = \sum_{k=1}^F R_{\text{ЭРТПФ}jk}^{\text{УК}} \tag{3}$$

где  $R_{\text{ЭРТПФ}jk}^{\text{УК}}$  – прогнозируемый вред от судов  $k$ -ого типа пассажирских судов на  $j$ -ом укрупненном участке, млн. руб./год;

$F$  – количество типов пассажирских судов, работающих на  $j$ -ом укрупненном участке.

$$R_{\text{ЭРТПФ}jk}^{\text{УК}} = P_{\text{ЭРТПФ}jk}^{\text{УК}} \cdot R_{\text{УСЛЭРТПФ}jk}^{\text{УК}} \tag{4}$$

где  $P_{\text{ЭРТПФ}jk}^{\text{УК}}$  – частота нанесения вреда при ТП от судов  $k$ -ого типа пассажирских судов на  $j$ -ом укрупненном участке, 1/год;

$R_{\text{УСЛЭРТПФ}jk}^{\text{УК}}$  – прогнозируемый экологический ущерб от ТП от использования  $k$ -ого типа пассажирских судов на  $j$ -ом укрупненном участке, млн. руб.

Формулу для определения частоты причинения вреда на  $j$ -ом укрупненном участке следует записать в следующем образом:

$$P_{\text{ЭРТПФ}jk}^{\text{УК}} = P_{\text{ТП}j}^{\text{УК}} \cdot P_{\text{ТПФ}jk}^{\text{УК}} \cdot P_{\text{ТПФЭР}jk}^{\text{УК}} \tag{5}$$

где  $P_{\text{ТП}j}^{\text{УК}}$  – частота ТП на  $j$ -ом укрупненном участке;

$P_{\text{ТПФ}jk}^{\text{УК}}$  – частота участия в ТП  $k$ -ого типа пассажирских судов на  $j$ -ом укрупненном участке;

$P_{\text{ТПФЭР}jk}^{\text{УК}}$  – частота причинения вреда  $k$ -ым типом пассажирских судов на  $j$ -ом укрупненном участке.

Для расчета частот  $P_{\text{ТПФ}jk}^{\text{УК}}$ ,  $P_{\text{ТПФЭР}jk}^{\text{УК}}$  и  $P_{\text{ТПФЭР}jk}^{\text{УК}}$  используются статистические данные по ТП.

$$P_{\text{ТП}j}^{\text{УК}} = \frac{n_{\text{ТП}j}}{T} \tag{6}$$

где  $n_{\text{ТП}j}$  – количество зарегистрированных ТП на  $j$ -ом укрупненном участке;

$T$  – период наблюдения, лет;

$$P_{\text{ТПФ}jk}^{\text{УК}} = \frac{n_{\text{ТПФ}jk}}{N_j}, \tag{7}$$

где  $n_{\text{ТПФ}jk}$  – количество ТП с  $k$ -ого типа пассажирских судов на  $j$ -ом укрупненном участке;

$N_j$  – количество ТП на  $j$ -ом укрупненном участке.

$$P_{ТПФЭРjk}^{УК} = \frac{n_{ТПФЭРjk}}{N_{jk}}, \quad (8)$$

где  $n_{ТПФЭРjk}$  – количество ТП с участием  $k$ -ого типа пассажирских судов с причинением вреда окружающей среде на  $j$ -ом укрупненном участке;

$$R_{УСЛЭРТПФjk}^{УК} = R_{УСЛРНТФjk}^{УК} + R_{УСЛНВТФjk}^{УК} + R_{УСЛСВТФjk}^{УК} + R_{УСЛМТФjk}^{УК} + R_{УСЛСТФjk}^{УК}, \quad (9)$$

где  $R_{УСЛРНТФjk}^{УК}$  – прогнозируемый экологический ущерб от разлива нефти и нефтепродуктов при ТП с  $k$ -ым типом пассажирских судов на  $j$ -ом укрупненном участке, млн. руб;

$R_{УСЛНВТФjk}^{УК}$  – прогнозируемый экологический ущерб от сброса нефтесодержащих вод при ТП на  $j$ -ом укрупненном участке с  $k$ -ого типа пассажирских судов, млн. руб;

$R_{УСЛСВТФjk}^{УК}$  – прогнозируемый экологический ущерб от сброса сточных вод при ТП на  $j$ -ом

$$R_{УСЛРНТФjk}^{УК} = R_{УСЛГТФjk}^{УК} = \sum_{z=1}^3 \sum_{d=1}^W P_{ВГjkz}^{УК} \cdot P_{МПjk d}^{УК} \cdot Y_{zd}, \quad (10)$$

где  $P_{ВГjkz}^{УК}$  – частота разлива нефти с судов  $k$ -ого типа пассажирских судов на  $j$ -ом укрупненном участке в  $z$ -е время года;

$P_{МПjk d}^{УК}$  – частота разлива нефти массой, входящей в интервал  $d$ , с  $k$ -ого типа пассажирских судов на  $j$ -ом укрупненном участке;

$Y_{zd}$  – размер ущерба, причиненный водному объекту от разлива нефти массой, входящей в интервал  $d$ , с  $k$ -ого типа пассажирских судов на  $j$ -ом укрупненном участке в  $z$ -е время года, млн. руб.;

$W$  – количество интервалов масс разлива нефти, определяется в соответствии с [8] с учетом статистических данных по массам разливов;

$Z$  – время года (весна, лето, осень).

Для расчета частот  $P_{ВГjkz}^{УК}$  и  $P_{МПjk d}^{УК}$  применим следующие формулы:

$$P_{ВГjkz}^{УК} = \frac{n_{ВГjkz}}{N_{jk}} \quad (11)$$

где  $n_{ВГjkz}$  – количество ТП с участием  $k$ -ого типа пассажирских судов на  $j$ -ом укрупненном участке в  $z$ -е время года;

$N_{jk}$  – количество ТП с  $k$ -ым типом пассажирских судов на  $j$ -ом укрупненном участке.

$$P_{МПjk d}^{УК} = \frac{n_{МПjk d}}{N_{jk}} \quad (12)$$

$N_{jk}$  – количество ТП с участием судов  $k$ -ого типа пассажирских судов на  $j$ -ом укрупненном участке.

Прогнозируемый экологический ущерб при ТП будет включать следующие составляющие:

укрупненном участке с  $k$ -ого типа пассажирских судов, млн. руб.;

$R_{УСЛСВТФjk}^{УК}$  – прогнозируемый экологический ущерб от затопления  $k$ -ого типа пассажирских судов и их частей при ТП на  $j$ -ом укрупненном участке, млн. руб.

Прогнозируемый ущерб от разлива нефти

$R_{УСЛРНТФjk}^{УК}$  зависит от времени года ТП и массы разлива (массы груза):

где  $n_{МПjk d}$  – количество ТП с разливом нефтью массой, входящей в интервал  $d$ , с участием  $k$ -ого типа пассажирских судов на  $j$ -ом укрупненном участке;

$n_{РНjk}$  – количество ТП с разливом нефтью на с участием  $k$ -ого типа пассажирских судов на  $j$ -ом укрупненном участке.

Размер ущерба водному объекту  $Y_{zd}$  рассчитывается в соответствии с методикой расчета размера вреда, причиненного водным объектам следствии нарушения водного законодательства [9].

$$Y_{zd} = K_{ВГz} \cdot K_{В} \cdot K_{ИН} \cdot K_{ДЛ} \cdot H_d \quad (13)$$

где  $K_{ВГz}$  – коэффициент, учитывающий  $z$ -ое время года в зависимости от климатических условий: весной  $K_{ВГ1}$  равен 1,25, летом -  $K_{ВГ2} = 1,10$ , осень -  $K_{ВГ3} = 1,15$ ;

$K_{В}$  – коэффициент, учитывающий состояние водных объектов, (для реки Волга составляет 1,41);

$K_{ИН}$  – коэффициент, учитывающий инфляционную составляющую экономического развития;

$K_{ДЛ}$  – коэффициент, учитывающий длительность периода воздействия нефтепродукта на водный объект при непринятии мер по его ликвидации;  $K_{ДЛ} = 1,1$  (до 6 часов включительно);



$H_d$  – такса для расчета размера убытка от сброса нефтепродуктов массой, входящей в интервал  $d$ .

Прогнозируемые ущербы при сбросе сточных и нефтесодержащих вод, мусора и затопления судов (или их частей) зависят от времени года наступления ТП:

$$R_{УСЛНВТФjk}^{УК} = R_{УСЛСВТФjk}^{УК} = R_{УСЛМТФjk}^{УК} = R_{УСЛСТФjk}^{УК} = \sum_{z=1}^3 P_{ВГjkz}^{УК} \cdot Y_z, \quad (14)$$

где  $P_{ВГjkz}^{УК}$  – частота сброса сточных и нефтесодержащих вод, мусора или затопления для  $k$ -ого типа пассажирских судов на  $j$ -ом укрупненном участке в  $z$ -е время года;

$Y_z$  – размер убытка, причиненный водному объекту сточными и нефтесодержащими водами, мусором и затоплением для  $k$ -ого типа пассажирских судов на  $j$ -ом укрупненном участке в  $z$ -е время года, млн. руб.;

При сбросе нефтесодержащих вод ущерб составит:

$$Y_z = K_{ВГz} \cdot K_B \cdot K_{ИН} \cdot H_{НВ} \cdot M_{НВ} \cdot K_{ИЗ} \quad (15)$$

где  $H_{НВ}$  – такса для расчета размера убытка от сброса нефтепродуктов из нефтесодержащих вод в водные объекты,  $H_{НВ} = 0,67$  млн.р./т;

$M_{НВ}$  – масса сброшенного нефтепродукта из нефтесодержащих вод в водный объект, т;

$K_{ИЗ}$  – коэффициент интенсивности воздействия нефтепродуктов на водный объект,  $K_{ИЗ} = 5$ , так как концентрация нефтепродуктов в нефтесодержащих водах больше предельно допустимой концентрации, принятой для рыбохозяйственных водоемов, и превышает ее более, чем в 50 раз.

Масса сброшенного в водный объект нефтепродукта в нефтесодержащих водах,  $M_{НВ}$ , т, рассчитывается по формуле:

$$M_{НВ} = V_{Ц}^{НВ} \cdot (C_{Ф} - C_{Д}) \cdot 10^{-6} \quad (16)$$

где  $V_{Ц}^{НВ}$  – объем цистерны для накопления нефтесодержащих вод, м<sup>3</sup>;

$C_{Ф}$  – средняя концентрация нефтепродуктов в нефтесодержащих водах, мг/л,  $C_{Ф} = 45000$  мг/л;

$C_{Д}$  – предельно-допустимая концентрация нефтепродуктов в воде ( $C_{Д} = 0,05$  мг/л) [7];

$10^{-6}$  – коэффициент пересчета концентрации нефтепродукта из мг/л в т/м<sup>3</sup>.

При сбросе сточных вод:

$$Y_z = K_{ВГz} \cdot K_B \cdot K_{ИН} \cdot H_{СВ} \quad (17)$$

где  $H_{СВ}$  – такса для расчета вреда от сброса сточных вод в водные объекты (в большинстве случаев  $H_{СВ} = 0,01$  млн.руб.)

При загрязнении водных объектов мусором размер вреда находится по формуле:

$$Y_z = K_{ВГz} \cdot K_B \cdot K_{ИН} \cdot K_{ЗАГР} \cdot H_M \cdot S_M \quad (18)$$

где  $K_{ЗАГР}$  – коэффициент загрязненности акватории водного объекта мусором, баллы (для судового мусора принимается равным 3);

$H_M$  – такса для расчета убытка водным объектам от загрязнения мусором (принимается равной 0,0008 млн. руб./м<sup>2</sup>);

$S_M$  – площадь акватории водного объекта, загрязненная мусором, м<sup>2</sup> (она зависит от объема накопительных судовых емкостей для сбора мусора и в среднем равна от 20 до 50 м<sup>2</sup>).

При затоплении судов и/или их частей ущерб составит:

$$Y_z = K_{ВГz} \cdot K_B \cdot K_{ИН} \cdot H_C \cdot B \quad (19)$$

где  $H_C$  – такса для исчисления размера убытка от затопления судов и/или их частей, (принимается 0,04 млн. руб./т);

$B$  – тоннаж затопленных судов и/или их частей, т.

Совокупность формул (2) - (19) представляет собой математическую модель оценки экологического риска ТП, с помощью которой можно оценить риски возникновения ТП и причинения от них вреда.

При несанкционированном сбросе отходов членами экипажа будут учитываться только три из указанных источников: хозяйственно-бытовые сточные воды; мусор с судов и сброс нефтесодержащей воды (формулы 10-13 и 19 исключаются).

Частота несанкционированных сбросов отходов определяется по данным органов государственного надзора и контроля в сфере экологической безопасности.

#### Заключение

Таким образом, в статье показана необходимость детальной разработки экологического обеспечения туристических мероприятий. Такая необходимость определяется

такими основными факторами, как разнообразие видов туристических проектов, а также условий их реализации. Экологическое обеспечение представляет собой комплекс природоохранных организационных мероприятий и технических средств. Разработка такого комплекса осуществляется с учетом содержания туристического проекта, природоохранных требований к переработке загрязнений в районе реализации проекта, а также навигационных условий. При этом весь процесс использования комплекса технических средств целесообразно представлять как процесс перемещения загрязнений, который в зависимости от условий водоотведения очищенной воды, а также

навигационных условий, может быть реализован посредством своей технологии. Это обеспечивает экологическую безопасность туристического мероприятия с максимально низкими для рассматриваемых условий затратами.

Своими дальнейшими задачами мы видим:

- апробирование предложенной модели;
- разработку организационных и технических мероприятий по снижению уровня экологического риска;
- разработку предложений по совершенствованию правовой базы по оценке экологических рисков от транспортных происшествий.

#### Литература

1. Федеральный закон N 132-ФЗ "Об основах туристской деятельности в Российской Федерации".
2. Колбовский Е. Ю. Экологический туризм и экология туризма : учеб. Пособие для студ. высш. учеб. заведений / Е. Ю. Колбовский. — М.: Издательский центр «Академия», 2006. — 256 стр.
3. Решняк В.И., Система управления экологической безопасностью при эксплуатации судов на внутренних водных путях /В.И.Решняк. — СПб, изд-вл ГУМРФ им. Адм. С.О.Макарова, 2017 г., 148 стр.
4. Решняк В.И., Решняк К.В., Оптимизация комплексного обслуживания флота, СПб, СПбГУВК, 2010 г., 29 стр.
5. Решняк В.И., Предотвращение загрязнения водоемов нефтесодержащей подсланевой водой при эксплуатации судов и судовых энергетических установок /В.И.Решняк. — СПб, СПбГУВК, 2011. — 207 с.
6. Пластинин А.Е., Домнина О.Л. Оценка экологического риска транспортных происшествий на водных объектах в республике Татарстан. В сборнике: ВЕЛИКИЕ РЕКИ' 2017 труды научного конгресса 19-го Международного научно-промышленного форума: в 3 томах. Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. 2017. С. 322-325.
7. Домнина О.Л., Захаров В.Н., Отделкин Н.С., Пластинин А.Е. Оценка экологического риска транспортных происшествий на водных объектах. Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4(42). Т.2. С. 79-86.
8. Пластинин А. Е. Оценка ожидаемого ущерба водным объектам при разливах нефти Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2013.№ 1 (20). С. 97-104
9. Приказ Минприроды России от 13.04.2009 N 87 (ред. от 26.08.2015) "Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства" (Зарегистрировано в Минюсте России 25.05.2009 N 13989)

#### References

1. Federal'nyy zakon N 132-FZ "Ob osnovakh turistskoy deyatel'nosti v Rossiyskoy Federatsii".
2. Kolbovskiy E. Yu. Ekologicheskij turizm i ekologiya turizma : ucheb. Posobie dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy / E. Yu. Kolbovskiy. M.: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2006. 256 p.
3. Reshnyak V.I., Sistema upravleniya ekologicheskoy bezopasnost'yu pri ekspluatatsii sudov na vnutrennikh vodnykh putyakh /V.I.Reshnyak. SPb, izd-vl GUMRF im. Adm. S.O.Makarova, 2017 g., 148 p.
4. Reshnyak V.I., Reshnyak K.V., Optimizatsiya kompleksnogo obsluzhivaniya flota, SPb, SPbGUVK, 2010 g., 29 p.
5. Reshnyak V.I., Predotvrashchenie zagryazneniya vodoemov neftesoderzhashchey podslanevoy vodoy pri ekspluatatsii sudov i sudovykh energeticheskikh ustanovok /V.I.Reshnyak. — SPb, SPbGUVK, 2011. 207 p.
6. Plastinin A.E., Domnina O.L. Otsenka ekologicheskogo riska transportnykh proisshestviy na vodnykh ob"ektakh v respublike Tatarstan. V sbornike: VELIKIE REKI' 2017 trudy nauchnogo kongressa 19-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma: v 3 tomakh. Nizhegorodskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet. 2017. p. 322-325.
7. Domnina O. L., Zakharov V. N., Otdelkin N. S., Plastinin A. E. Assessment of environmental risk of traffic accidents on water bodies. Marine intellectual technologies. 2018. Volume 2 Issue 4. p. 79-86
8. Plastinin A. E. Otsenka ozhidaemogo ushcherba vodnym ob"ektam pri razlivakh nefi Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2013.№ 1 (20). p. 97-104
9. Prikaz Minprirody Rossii ot 13.04.2009 N 87 (red. ot 26.08.2015) "Ob utverzhenii Metodiki ischisleniya razmera vreda, prichinennogo vodnym ob"ektam vsledstvie narusheniya vodnogo zakonodatel'stva" (Zaregistrovano v Minyuste Rossii 25.05.2009 N 13989)

УДК 656.613.1

## АНАЛИЗ РЫНКА ЦИФРОВЫХ ИНВЕСТИЦИЙ И ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РАЗВИТИИ МОРСКИХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Наталья Александровна Журавлева**

доктор экономических наук, профессор кафедры экономика транспорта  
Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I  
190031, Санкт-Петербург, пр. Московский, 9  
e-mail: zhuravleva\_na@mail.ru

**Вячеслав Михайлович Шавшуков**

доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры экономической теории  
и экономической политики  
Санкт-Петербургский государственный университет  
191123, Санкт-Петербург, ул. Чайковского, 62  
e-mail: shavshukov@rambler.ru

### Аннотация

В статье представлены результаты оценки влияния цифровых инвестиций (Initial coin offering - ICO) на развитие высокотехнологичного и инновационного бизнеса, а также разработку и внедрение цифровых технологий в отрасли реального сектора, в частности морской инфраструктуры и перевозок. Систематизированы предпосылки и условия вхождения цифровых инвестиций в экономику нового технологического уклада. Показано, что темпы цифровизации ведут к стремительной модификации и адаптации процессов ICO, как возможного ключевого компонента будущего финансового рынка. Показана природа цифровых активов и инвестиций, отражающая потребность экономики и общества в общественно-частном партнерстве при решении интеллектуальных, социальных, инфраструктурных и иных задач, формируемых современным миром. Обоснован вывод о наличии принципиально новых свойств цифровых инвестиций, а именно, способность мгновенного вхождения в проект, высокой нормой прибыли и возможность использования цифровых денег. Выявлена взаимосвязь притока средств для финансирования проектов создания цифровых технологий с высоким риском их реализации. Дана оценка перспектив расширения области применения цифровых инвестиций в развитии интеллектуальных морских технологий.

Методология исследования построена на анализе природы цифровых инвестиций, их вхождения в различные сектора экономики и влияния на цифровую модель бизнеса. Используются аналитические процедуры выявления причинно-следственных связей вложения цифровых денег в проекты реальной и виртуальной экономики, их влияния на будущие рынки капитала. Информационная основа исследования опирается на репрезентативную выборку динамики цифровых инвестиций в различные категории активов, ожиданий и результатов вложений, аналитических отчетов по процессам и процедурам ICO.

**Ключевые слова:** цифровые инвестиции, токены, блокчейн, смарт-контракты, интеллектуальные системы, морские перевозки.

## THE ANALYSIS OF DIGITAL INVESTMENT MARKET AND ASSESSMENT OF PROSPECTS FOR THEIR USE IN THE DEVELOPMENT OF MARINE INTELLIGENT TECHNOLOGIES

**Natalia A. Zhuravleva**

the professor, Dr.Sci.Econ.,  
the professor of Transport economics department  
Saint-Petersburg state transport university  
Moskovskiy prospect, St. Petersburg, 190031, Russian Federation  
e-mail: zhuravleva\_na@mail.ru

**Vyacheslav M. Shavshukov**

the professor, Dr.Sci.Econ.,  
the professor of Department of economic theory and economic policy  
Saint-Petersburg state university  
Chaikovskiy, 62, St. Petersburg 191123, Russian Federation  
e-mail: shavshukov@rambler.ru

### Abstract

The article presents the results of the assessment of the impact of digital investments (Initial coin offering-ICO) on the development of high-tech and innovative business, as well as the development and implementation of digital technologies in the real sector, in particular Maritime infrastructure and transportation. The prerequisites and conditions for the entry of digital investments into the economy of the new technological order are systematized. It is shown that the pace of digitalization leads to rapid

modification and adaptation of ICO processes as a possible key component of the future financial market. The nature of digital assets and investments is shown, reflecting the need of the economy and society in public-private partnership in solving intellectual, social, infrastructure and other problems formed by the modern world. The conclusion about the presence of fundamentally new properties of digital investments, namely, the ability of instant entry into the project, a high rate of return and the possibility of using digital money is substantiated. Interrelation of inflow of funds for financing of projects of creation of digital technologies with high risk of their realization is revealed the assessment of prospects of expansion of the field of application of digital investments in development of intellectual sea technologies is given.

The research methodology is based on the analysis of the nature of digital investments, their entry into various sectors of the economy and the impact on the digital business model. Analytical procedures were used to identify the cause-and-effect relationships of investing digital money in real and virtual economy projects, their impact on future capital markets. The information basis of the study is based on a representative sample of the dynamics of digital investments in various categories of assets, expectations and results of investments, analytical reports on ICO processes and procedures.

**Key words:** digital investments, tokens, blockchain, smart contracts, intelligent systems, sea transportation.

### Введение

Стремительное развитие цифровых технологий и меняющаяся под их воздействием модель бизнеса, становятся одним из важнейших предметов научных исследований. Уже очевидно влияние цифровизации на рост конкурентоспособности ряда отраслей, появление новых возможностей предпринимателям и бизнесу в целом, рост скорости доступа к различным мировым рынкам товаров и услуг, а также появление глобальных электронных цепочек создания стоимости.

Цифровое развитие стало приоритетом не только ведущих мировых экономик, но и развивающихся стран, получающих в глобальном мире практически равные возможности на лидерство в различных технологиях. Но реализация этих возможностей существенно ограничена традиционным инструментарием финансирования цифровых проектов. И, если традиционные отрасли имеют инвестиционный потенциал, сложенный из собственных инвестиционных источников, из надежной кредитной истории, поддержки государственного бюджета и государственных фондов, то новые технологии (в большей степени фирмы – стартапы) такой возможности лишены. Более того, даже в традиционных отраслях экономики внедрение интеллектуальных технологий часто ограничено существующей моделью ведения бизнеса, основанной на устоявшихся схемах и процедурах привлечения долевого и долгового капитала. Эти схемы отражают узаконенные процедуры инвестирования, которые ограничивают вложения в высокорисковые новые технологии.

Практически до последнего времени цифровые и иные интеллектуальные проекты существовали без серьезной частно-государственной поддержки, четкого государственного регулирования, опираясь, преимущественно на венчурный бизнес, стартапы и разработки военно-промышленного комплекса. Это стало причиной того, что цифровой рынок представлен частными инвесторами, также использующими новые интеллектуальные технологии при аккумулировании и вложениях цифровых инвестиционных ресурсов. Достаточно отметить, что привлечение цифровых инвестиций или «crowdsale» происходит в криптовалюте: биткойны (Bitcoin), эфириум (ETH), рипл (XRP),

Tether (USTD), лайткойны (LTS) и т.д. в виде продажи инвесторам фиксированного количества новых единиц криптовалют, полученных разовой или ускоренной эмиссией [1,2]. На сегодняшний день таких криптовалют около 3000 [3]. Далее, в ходе ICO команда проекта распродает цифровые токены за криптовалюты или фиатные деньги среди инвесторов. Фиатные деньги по своей сути являются известным способом выпуска символических бумажных, билонных монет, кредитных, необеспеченных денег. Жизнь электронных денег развивается в виртуальном финансовом пространстве с реальной финансовой инфраструктурой и формируемом регулированием. Электронные деньги используются на электронных платформах различных проектов в качестве внутренней валюты или продаются на биржах.

Целью исследования является анализ развивающегося рынка цифровых инвестиций, процессов его регулирования и правил поведения на нем, оценка возможностей ICO в развитии интеллектуальных морских технологий, обеспечивающих эффективность морской транспортной инфраструктуры и перевозок.

Объектом исследования являются цифровые интеллектуальные технологии, такие как: технология распределенного реестра, блокчейн, смарт-контракты, интеллектуальные транспортные системы, обеспечивающие рост эффективности новой финансовой модели морских перевозок. Предметом исследования являются процессы и процедуры ICO в цифровом пространстве первичного размещения виртуальных активов (токенов).

В отличие от публичного размещения акций процесс размещения цифровых активов (токенов) не регламентирован: его проведение практически не требует финансовых вложений, нет минимальных требований к эмитенту, аудиту и другим сопутствующим процедурам IPO.

Таким образом, ICO имеет перспективы быть открытым для любого инвестора, который хочет инвестировать в технологии следующего поколения. Важно отметить, что ICO является одной из форм краудфандинга, - коллективного финансирования. Это очевидная форма общественно-государственного партнерства в развитии проектов новых интеллектуальных технологий [4]. Несмотря на то, что объем рынка

криптовалют пока незначителен на пространстве глобальных финансовых рынков и составляет на сегодняшний день 177 миллиардов долларов США, темпы роста ICO удваиваются ежегодно [5]. Именно это обстоятельство обуславливает актуальность данного исследования.

### 1. Историография

Научной литературы, исследующей процессы и перспективы ICO, представлено чрезвычайно мало. Информационное пространство занимают оперативные аналитические отчеты по котировке криптовалют, новостные ленты об изменениях в государственном регулировании цифрового рынка различных стран, а также хроники криминальных событий на данном рынке. Тем не менее, рядом авторов разрабатываются методологические и концептуальные основы формирования рынка цифровых инвестиций.

Следует отметить работу Д. Фридгена, Ф. Регнера, А. Швейзера, Н. Урбака [6], в которой предложены направления разработки теории цифровых активов и инвестиций. Авторы подчеркивают, что ICO, являясь новой формой краудфандинга, несмотря на ежегодные инвестиции только в США в размере более 4,5 млрд долларов США, плохо изучено. В частности, отмечают, что научным исследованиям не хватает структурированной классификации цифровых инвестиций и предлагают описание их преобладающих архетипов и вариантов проектирования.

Одним из наиболее серьезных исследований цифровых активов и методов управления их портфелем, максимизирующим прибыль инвесторов, следует отметить руководство для цифрового инвестора Криса Бёрниска и Джека Татара [7]. Авторы описывают методы управления портфелем для максимизации прибыли при одновременном управлении рисками вложения в цифровые активы. Приведен исторический контекст появления цифровых инвестиций, даны аналитические прогнозы изменений структуры текущих портфелей цифровых инвестиций и развитии технологии blockchain.

Достаточно много исследований посвящено анализу перспектив развития процессов регламентирования и регулирования использования различных видов криптовалют, в частности, Биткойна. (Дж. Брито, Х. Шадаб и А. Кастилло О'Саливан) Описаны типы криптовалют с максимальным потенциалом развития [8].

Технология ICO, как доминирующая парадигма финансирования в блокчейн индустрии, достаточно подробно представлена в работе М. Чансона. М. Русиуса и Ф. Вортманна. Проанализировав 96 ICO авторы подчеркивают, что сам феномен ICO еще не вполне изучен и предлагают исследовать процессы цифрового инвестирования с применением стандартных процедур оценки инвестиционных активов на финансовом рынке. Их выводы подчеркивают принципиальное отличие цифровых от всех иных видов инвестиций и подтверждают высокие темпы прироста цифровых проектов [9].

Классификация и особенности развития различных ICO даны в работе Д. Стачера. Автором

представлен структурный анализ цифрового инвестирования на конец 2018 года с учетом показателя внутренней доходности (ROI) по отдельным проектам. Произведен SWOT анализ цифровых инвестиций. Описана реакция регуляторов отдельных стран на явление ICO [10].

Активная дискуссия о сути цифровых инвестиций ведется на площадках компании Ernst & Young [11] и Pricewaterhouse Coopers [12]. Последние исследования, проведенные этими компаниями, показывают, что ICO получают дополнительную динамику и проявляются как работоспособная, альтернативная форма краудфандинга (коллективное партнерство финансовых доноров, добровольно вкладывающих свои ресурсы, в том числе денежные в проекты реципиентов посредством электронной среды.

В работе Л. Арнолд, М. Бреннеке, П. Камус, Г. Фридген и др. утверждается, что ICO, реализуемое на базе технологии блокчейн, является инвестициями без посредников, представляя собой надежную альтернативу традиционным методам краудфандинга. Т.е. средства, собираемые в обмен на так называемые токены Blockchain могут представлять любую традиционную форму базового актива и использоваться, в частности, для подтверждения наличия долевых активов компании, репутации пользователей в онлайн-системах, депозитов фиатных валют и остатков в криптовалютных системах [13].

Таким образом, анализ основных публикаций по природе, технологиям и процедурам цифрового инвестирования показывает, что это, прежде всего, коллективное партнерство инвесторов, или общественное партнерство, регулируемое государством и обеспечивающее развитие новых интеллектуальных технологий в современной глобальной экономике и ее национальных сегментов.

### 2. Сущность цифровых инвестиций

Цифровые инвестиции являются продуктом глобального финансового рынка и отражают потребности общества в общественно-частном партнерстве, способном обеспечить приток инвестиций в основные элементы социальной, транспортной, научной и иных видов инфраструктуры. Общественно-частное партнерство как элемент новой инвестиционной культуры может сформировать новый формат публично-частных гражданско-правовых отношений регуляторов, бизнеса, НКО и всех участников цифрового рынка по совместному осуществлению инновационно-инвестиционных проектов, в ходе которых они объединяют свои активы и имущественные полномочия, распределяют расходы и риски, совместно используют результаты.

Обосновываясь на модели «краудфандинга» (от англ. Crowd funding, crowd – толпа, funding – финансирование) – т.е. коллективного сотрудничества людей (доноров денежных средств), ICO добровольно объединяет денежные или другие ресурсы частных лиц и компаний с различным юридическим статусом через Интернет в коммерческих и социальных целях.

Понятие ICO неразрывно связано с криптовалютами и технологией блокчейн, являющейся реплицированной распределительной базой данных. ICO реализуется в виде предварительной эмиссии компанией своей криптовалюты без процедур майнинга (выпуска криптовалюты посредством совершения вычислительных операций при помощи соответствующих инструментов) и распределении данной эмиссии среди заинтересованных лиц.

На начальных стадиях своего становления ICO показал себя как хороший способ привлечь

внимание к отдельным, прежде всего, венчурным проектам разработки и внедрения цифровых технологий, а также способом получения инвестиции, необходимые для реализации таких проектов.

По своей сути ICO нарушают традиционное финансирование, создавая гибридные модели сочетающие умные деньги и поддержку сообщества. Анализ действующих ICO показывает, что можно выделить их следующие отличительные признаки (табл. 1).

Таблица 1

**Структурирование основных признаков цифровых инвестиций**

Признаки ICO	Содержание
Преинвестиционная подготовка	<ul style="list-style-type: none"> <li>– структурирование раундов сбора средств с максимальным увеличением финансирования;</li> <li>– обеспечение прозрачности финансирования проектов;</li> <li>– сочетание с венчурным финансированием для диверсификации источников финансирования и проверка проекта с профессиональными инвесторами (например, предложение перепродажи в VCs)</li> <li>– избегание агрессивного продвижения ICO, так как это подрывает доверие к проекту;</li> <li>– усиление внимания предпродажной фазе и работе с целевыми инвесторами</li> </ul>
Правовая настройка	<ul style="list-style-type: none"> <li>– тщательная оценка и выбор юрисдикции, в которой находится компания, выпускающая токены;</li> <li>– требование предварительной регистрации для инвесторов в сочетании с KYC (know your customer, ), обязательной идентификацией и установлением личности контрагента, прежде чем проводить финансовую операцию;</li> <li>– установление лимитов идентификации инвесторов по процедуре политики против отмывания денежных средств (AML)</li> </ul>
Отношения с инвесторами	<ul style="list-style-type: none"> <li>– интерактивный протокол для решения проблемы определенности участия и желания покупки с помощью смарт-контракта;</li> <li>– вводится период блокировки токенов для оценки преимущества / рисков инвестиционного решения;</li> <li>– прозрачная коммуникация во время и после ICO (например, что происходит с токенами и как отреагирует регулятор)</li> </ul>
Процедуры	<ul style="list-style-type: none"> <li>– поэтапное выделение средств команде разработчиков, включая голосование при выборе механизма обеспечения надлежащего использования средств и увеличения ответственности за эффективное распределение ресурсов</li> <li>– отдельные процедуры обеспечения кибербезопасности до и после ICO</li> <li>– адаптация к чистым формам краудфандинга / - кредитования фирмами – стартапами;</li> <li>– активизация сообществ по интересам и развитию</li> <li>– преимущество экосистемы против чистого технического развития инфраструктуры</li> </ul>

Начальное предложение цифровых инвестиций (описывается также как «запуск токенов» или «генерация токенов»), что терминологически означает ограниченный период времени, в течение которого компания предлагает предопределенное количество цифровых токенов (криптовалют) для инвесторов, обычно в обмен на крупные криптовалюты или все чаще за фиатные валюты. В зависимости от юрисдикции, они могут принимать различные формы, как utility или security token (цифровая валюта). Utility token (“токены полезности”) предоставляют пользователям доступ к продукту или услуге в будущем иногда со значительной скидкой. Наиболее полезны в стартапах, которые могут привлекать капитал для финансирования разработки своих блокчейн-проектов через utility tokens, а пользователи могут

предоставлять доступ к услуге в будущем. В свою очередь, Security token (“токены безопасности”) являются прототипом “токенов-акций”, предоставляющих право собственности на долговой или долевого капитал организаций.

В перспективе ICO имеют шанс стать альтернативой классическому долгу (капитал-финансирование) и стать серьезным инвестиционным ресурсом в реальные активы, прежде всего подверженные трансформации под воздействием интеллектуальных и цифровых технологий. Морские транспортные системы и есть тот самый реальный актив, на котором формируется новая цифровая бизнес-модель: «умная инфраструктура», роботы и роботизация процессов перевозки, распределенный реестр, технология блокчейн и смарт-контракты уже

известные в организации смешанных перевозок на основе морских контейнерных перевозок.

### 3. Особенности инвестирования в развитие морских транспортных систем и оценка возможности применения ИСО в финансировании разработки и внедрения интеллектуальных технологий

Мировое инвестиционное пространство достаточно консервативно, подвержено глубоким циклическим изменениям, что особенно заметно в последнее десятилетие. Российский сегмент глобального финансового рынка, помимо этих признаков, специфичен, поскольку подвержен действию либерально-монетарной модели Центрального Банка РФ, сжимающей денежную массу и сокращающей инвестиции в целях борьбы с инфляцией. И прежде всего это отражается на инвестициях в развитие базовых инфраструктурных отраслей к которым относится морской транспорт. Такая политика серьезно тормозит развитие российской транспортной системы и, конечно, сдерживает внедрение новых технологий строительства, эксплуатации морской инфраструктуры и не способствует росту эффективности организации морских перевозок.

Инвестиции в данной сфере всегда связаны с конкурентоспособностью бизнеса, процессов, инфраструктуры, технологий, а по сути с эффективностью перевозок грузов и пассажиров. Для многих стран наличие качественной и эффективной морской инфраструктуры является одним из ключевых факторов экономического роста, что совершенно справедливо. Так, несмотря на значительные вложения в морскую портовую инфраструктуру (1 трлн. долларов США за последние 20 лет) Минтранс США подтверждает, экономика страны теряет до 40 млрд долларов ежегодно из-за дефицита глубоководных портов и очередей на разгрузке.

Отсутствие соответствующей статистики в РФ не позволяет достоверно оценить потери нашей экономики от недофинансирования морской инфраструктуры и постоянных проблем с вывозом грузов, но, очевидно, что они не меньше.

Важнейшим фактором, меняющим инвестиционное пространство в мире, становится переход к новому технологическому укладу. Следует отметить существенное изменение структуры перевозок, направлений грузопотоков, требований клиентов к росту скорости перевозки. В частности, очевидно, как меняются инвестиционные аппетиты судовладельцев: они все больше инвестируют в суда, работающие на метаноле, водороде, солнечных батареях и прочем экологически чистом топливе. Также очевидна диверсификация бизнеса морских перевозок в услуги по всей цепочке поставок, в частности, эксплуатацию и оперирование плавучими регазификационными установками.

Изменение инвестиционного климата требует принципиально иной экономической модели инфраструктурного обеспечения, организации и управления морскими перевозками. Эта модель должна отражать тот факт, что клиенту нужна доставка от «двери до «двери», т.е. услуга по перевозке становится смешанной, включающей

все виды транспорта (как правило, морской, железнодорожный, автомобильный). Межвидовая конкуренция в этой модели трансформируется в конкуренцию по процессам перевозки. Стоимость услуги по перевозке должна соответствовать уровню конкуренции перевозимых товаров на товарных рынках, т.е. транспортная составляющая в цене товара должна обеспечить приемлемую доходность клиента. Эти проблемы невозможно решить без новых интеллектуальных (цифровых) технологий.

Наглядные данные рис. 1 позволяют утверждать, что в транспортной системе России происходит постепенная эволюционная трансформация – движение в направлении цифровой модели экономического развития. Реальный рост инвестиций в цифровые технологии на транспорте (без инфляционного влияния) за период с 2005 по 2018 г. составил 5-кратную величину. В России темп роста цифровых инвестиций ниже, чем в целом по развитым странам. Но в последние годы, согласно официальной статистике, рост инвестиций вышел к траектории геометрической прогрессии.



Рис. 1. Динамика инвестиций в информационно-коммуникационные (цифровые) технологии транспортных организаций России в номинальном и реальном выражении за период 2005-2018 гг.

Источник: построено авторами на основе официальной статистической отчетности крупных и средних организаций, публикуемой Федеральной службой государственной статистики России (Росстатом).

Примечание: в методологии Росстата к инвестициям в цифровые технологии относятся затраты на приобретение вычислительной техники, телекоммуникационного оборудования, программного обеспечения.



Рис. 2. Сопоставительные данные по динамике инвестиций в цифровые технологии организаций транспорта в целом, в том числе водного транспорта в 2014-2018 гг.

*Источник: построено авторами на основе данных Росстата по крупным и средним организациям*

На рис. 2 приведены показатели по инвестициям в цифровые технологии водного транспорта в сравнении с консолидированными данными по всему транспортному комплексу России. В среднегодовом измерении в 2014-2018 гг. инвестиции в цифровые технологии организаций водного транспорта составили 0,43% от выручки компаний, что даже выше, чем в целом по транспорту (0,35%). Поэтому делаем вывод о том, что российские судоходные компании в последние годы все более интенсивно стремятся к инвестированию в пользу внедрения, использования, развития цифровых транспортных технологий.

Прежде всего, это интеллектуальные технологии, обеспечивающие рост эффективности специализированных перевозок, привязанных к грузовой базе, обеспечивающие безбарьерные логистические цепочки «железная дорога – порт». Эти технологии должны обеспечивать снижение эксплуатационных расходов всех участников перевозки. Другое направление – это мультипродуктовые перевозки, эффективность которых связана с организацией мультимодальных и интермодальных цепочек поставок. Сегодня уже есть успешные кейсы использования цифровых технологий, в частности распределенного реестра и блокчейн, обеспечивающие такую эффективность. В частности, компания Maersk, организовавшая цифровую цепочку поставок. В ряде стран тестируются технологические решения создания беспилотных судов (автономных операций, оптимизирующих синхронную работу различных технологий датчиков в разных климатических условиях).

Цифровые инвестиции являются тем ресурсом, который может нарастающими темпами обеспечивать развитие интеллектуальных технологий. Уже очевидно, что именно эти технологии обеспечат эффективность бизнеса в новом технологическом укладе. Но им, как и любому другому виду инвестиций нужны безопасные, четко регулируемые и формализованные (понятные инвестору) условия. Законодательство практически всех стран озабочено этим регулированием и идет в

направлении его развития. Даже такие страны как Китай, декларировавший консервативный подход к криптоэкономике в 2018 году, сейчас называет создание цифровой валюты в качестве приоритетных направлений цифровизации национальной экономики. В России пока правовое определение криптовалют и их сущность никак не определены в законодательстве. Это может серьезно тормозить развитие инвестиционной среды технологий нового уклада.

Финансовый мир, меняясь под новыми технологиями производства и потребления, сам формирует и внедряет эти технологии, создавая цифровое инвестиционное пространство. Изучение его поведения и оценка последствий, которые будут до конца понятны в ближайшее время является чрезвычайно важным на рынках новых технологий.

### Заключение

Проведенное исследование подтверждает почти геометрическую прогрессию роста цифровых инвестиций в мире, а также в России. Сегментация их распределения по отраслям отражает четкую тенденцию стремления в интеллектуальные и цифровые технологии, развитие которых в новом технологическом укладе обеспечивается краудфандингом как определенной формой общественно-частного партнерства или коллективного финансирования. Сфера морской инфраструктуры и перевозок демонстрирует рост «инвестиционного аппетита» на внедрение интеллектуальных технологий производства и организации транспортной услуги. Формируется новая модель бизнеса, отражающая изменение следующего технологического уклада.

Принципиально новые свойства цифровых инвестиций с высокими рисками и высокой нормой прибыли, незамедлительной реакцией и возможностью электронного участия в проекте с использованием цифровых денег открывают широкие перспективы их участия в развитии интеллектуальных морских технологий.

Исследования данного феномена находятся в самом начале. Мы можем наблюдать успешные и провальные кейсы ICO по всему миру. Их анализ, обобщение, встраивание в теорию и методологию инвестиций, формирование надежных методик и процедур цифрового инвестирования становится важнейшей задачей науки.

### Литература

1. Chohan, Usman W. (2017). Initial Coin Offerings (ICOs): Risks, Regulation, and Accountability. (Discussion Paper Series: Notes on the 1<sup>st</sup> Century). Available at <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3080098> (accessed: 6 December 2017).
2. Frankfield, Jake (2018). Initial Coin Offering (ICO). Investopedia. (accessed: 20 December 2018).
3. Все криптовалюты. Доступно по: <https://ru.investing.com/crypto/currencies> (дата обращения: 29 октября 2019).
4. Журавлева Н.А. (2010). Общественно-частное партнерство как организационно-правовая форма развития инфраструктуры. Российское предпринимательство, 11(7): 17-22.
5. Обзор рынка криптовалют на 25.04.2019 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bit.news/analitika/obzor-rynka-kriptovalyut-na-25-04-2019> (дата обращения: 29 октября 2019).
6. Fridgen, Gilbert, Regner, Ferdinand, Schweizer, André & Urbach, Nils. (2018). Don't Slip on the Initial Coin Offering (ICO) - A Taxonomy for a Blockchain-enabled Form of Crowdfunding. (Twenty-Sixth European Conference on Information Systems (ECIS 2018), At Portsmouth, UK).
7. Chris Burniske, Jack Tatar (2017). Cryptoassets: The Innovative Investor's Guide to Bitcoin and Beyond. McGraw-Hill Education. October 20th 2017.



8. Brito, Jerry, Shadab, Houman B. and Castillo O'Sullivan, Andrea (2015). Bitcoin Financial Regulation: Securities, Derivatives, Prediction Markets, and Gambling. *Columbia Science and Technology Law Review* . Available at <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2423461>.
9. Chanson, Mathieu, Risius, Marten and Wortmann, Felix. (2018). Initial Coin Offerings (ICOs): An Introduction to the Novel Funding Mechanism Based on Blockchain Technology. Twenty-fourth Americas Conference on Information Systems, At New Orleans, LA.
10. Stacher, David (2018). Master's thesis: Regulation of Initial Coin Offering (ICO) - An International Comparison with Focus on Switzerland. (Chair of Economic Theory Universität Basel).
11. EY research: initial coin offerings (ICOs). December 2017.
12. Diemers, Daniel, Henry Arslanian, Grainne McNamara, Gunther Dobrauz, Lukas Wohlgutmuth (2018). Initial Coin Offerings. A strategic perspective. *Strategy & PwC*.
13. Arnold, Laurin, Martin Brennecke, Patrick Camus, Gilbert Fridgen, Tobias Guggenberger, Sven Radszuwill, Alexander Rieger, André Schweizer, Nils Urbach (2019). Blockchain and Initial Coin Offerings: Blockchain's Implications for Crowdfunding. *Business Transformation through Blockchain*.

#### References

1. Chohan, Usman W. (2017). Initial Coin Offerings (ICOs): Risks, Regulation, and Accountability. (Discussion Paper Series: Notes on the 1<sup>st</sup> Century). Available at <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3080098> (date of access: 6<sup>th</sup> December, 2017).
2. Frankenfield, Jake (2018). Initial Coin Offering (ICO). Investopedia (accessed: 20<sup>th</sup> December, 2018).
3. Vse kryptovalyuty. Accessed: <https://ru.investing.com/crypto/currencies> (date of access: 29<sup>th</sup> October, 2019).
4. Zhuravleva N.A. (2010) Obschestvenno-chastnoye partnerstvo kak organizatsionno-pravovaya forma razvitiya infrastruktury. *Rossiiskoye predprinimatelstvo*, 11(7), pp.17-22.
5. Obzor rynka kryptovalyut na 25 of April, 2019 [Net recourse]. Accessed: <https://bit.news/analitika/obzor-rynka-kryptovalyut-na-25-04-2019> (date of access: 29<sup>th</sup> October 2019).
6. Fridgen, Gilbert, Regner, Ferdinand, Schweizer, André & Urbach, Nils. (2018). Don't Slip on the Initial Coin Offering (ICO) - A Taxonomy for a Blockchain-enabled Form of Crowdfunding. (Twenty-Sixth European Conference on Information Systems (ECIS 2018), At Portsmouth,UK).
7. Chris Burniske, Jack Tatar (2017). *Cryptoassets: The Innovative Investor's Guide to Bitcoin and Beyond*. McGraw-Hill Education (access: 20<sup>th</sup> October, 2017).
8. Brito, Jerry, Shadab, Houman B. and Castillo O'Sullivan, Andrea (2015). Bitcoin Financial Regulation: Securities, Derivatives, Prediction Markets, and Gambling. *Columbia Science and Technology Law Review* . Available at <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2423461>.
9. Chanson, Mathieu, Risius, Marten and Wortmann, Felix. (2018). Initial Coin Offerings (ICOs): An Introduction to the Novel Funding Mechanism Based on Blockchain Technology. Twenty-fourth Americas Conference on Information Systems, At New Orleans, LA.
10. Stacher, David (2018). Master's thesis: Regulation of Initial Coin Offering (ICO) - An International Comparison with Focus on Switzerland. (Chair of Economic Theory Universität Basel).
11. EY research: initial coin offerings (ICOs) (access: December, 2017).
12. Diemers, Daniel, Henry Arslanian, Grainne McNamara, Gunther Dobrauz, Lukas Wohlgutmuth (2018). Initial Coin Offerings. A strategic perspective. *Strategy & PwC*.
13. Arnold, Laurin, Martin Brennecke, Patrick Camus, Gilbert Fridgen, Tobias Guggenberger, Sven Radszuwill, Alexander Rieger, André Schweizer, Nils Urbach (2019). Blockchain and Initial Coin Offerings: Blockchain's Implications for Crowdfunding. *Business Transformation through Blockchain*.

УДК 629.12.001.2

## ПРИМЕНЕНИЕ ОЗОНА В ПРОЦЕССАХ ОЧИСТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩЕЙ ЛЬЯЛЬНОЙ (ПОДСЛАНЕВОЙ) ВОДЫ

**Валерий Иванович Решняк**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химии и экологии  
Санкт-Петербургский государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О.  
Макарова  
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: RV53@mail.ru

**Андрей Евгеньевич Пластинин**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: plastininae@yandex.ru

**Виктор Степанович Наумов**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой охраны окружающей среды и производственной безопасности  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: naumov1@vgavt-nn.ru

**Анатолий Сидорович Слюсарев**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603951, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

### Аннотация

Представлены результаты исследования процесса очистки нефтесодержащей льяльной (подсланевой) воды, образующейся при эксплуатации судов, окислением, с целью разработки рекомендаций по применению в процессах ее очистки в качестве окислителя озона.

Показано, что удовлетворение современных требований к качеству очистки с учетом свойств льяльной (подсланевой) воды может быть обеспечено при окислении нефтепродуктов озоном. Установлены основные стадии процесса очистки, начиная от организации реакционного контакта реагирующих веществ, учитывая, что первоначально эти вещества находятся в разных средах – озон – в озono-воздушной смеси, а эмульгированные нефтепродукты – в объеме очищаемой воды, и заканчивая процессом коагуляции продуктов реакции окисления. Представлены теоретические зависимости, позволяющие рассчитать время реакции окисления, что позволяет рассчитать объем реактора. Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологии очистки нефтесодержащей льяльной (подсланевой) воды и при проектировании очистных устройств.

**Ключевые слова:** нефтесодержащая льяльная (подсланевая) вода, эмульгированные нефтепродукты, озон, окисление.

## THE APPLICATION OF OZONE IN THE PROCESSES OF OIL-CONTAINING BILGE WATER PURIFICATION

**Valery I. Reshnyak**

the professor, Dr.Sci.Tech.,  
the head of the Department of the chemical and ecology,  
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
Dvinskajya, 5/7, St. Petersburg 199035, Russian Federation  
e-mail: RV53@mail.ru

**Andrey E. Plastinin**

the assoc. professor, Dr.Sci.Tech.  
the professor of the Chair of Environmental Protection and Industrial Safety  
Volga Sate University of Water Transport  
Nesterova, 5, Nizhny Novgorod 603951, Russian Federation  
e-mail: plastininae@yandex.ru

**Viktor S. Naumov**

the professor, Dr.Sci.Tech.  
the head of the Chair of Environmental Protection and Industrial Safety  
Volga Sate University of Water Transport  
Nesterova, 5, Nizhny Novgorod 603951, Russian Federation  
e-mail: naumov1@vgavt-nn.ru

**Anatoliy.S. Slyusarev**

the assoc. professor, Dr.Sci.Tech.  
 the professor of lifting and transport machines and machine repair Department  
 Volga Sate University of Water Transport  
 Nesterova, 5, Nizhny Novgorod 603951, Russian Federation  
 e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

**Abstract**

The results of the study of the oil-containing bilge water purification process generated during the operation of ships by oxidation are presented in order to develop recommendations for the use of ozone as an oxidizing agent in purification processes.

It is shown that the satisfaction of modern requirements for the quality of treatment, taking into account the properties of bilge water, can be ensured by the oxidation of oil products by ozone. The main stages of the purification process have been established, starting from the organization of the reaction contact of the reacting substances, taking into account, that initially these substances are in different environments - ozone - in the ozone-air mixture, and emulsified petroleum products - in the volume of water being purified, and ending with the process of coagulation of the products of the oxidation reaction. Presented theoretical dependences help to calculate the oxidation reaction time, which makes it possible to calculate the reactor volume. The results of the study can be used in the development of technology for the purification of oily bilge water and in the design of treatment devices.

**Key words:** oil bilge water, emulsified petroleum products, ozone, oxidation.

**Введение**

Современные требования к качеству очистки льяльной (подсланевой) воды, а также ее свойства определяют технологию очистки.

Установлено, что нефтепродукты в льяльной (подсланево) воде содержатся в двух состояниях – в виде отдельного слоя (пленки) и эмульгированном [1]. Существующие требования к качеству очистки льяльной (подсланевой) воды устанавливают предельное значение концентрации нефтепродуктов в очищенной воде, которая может быть сброшена за борт, в диапазоне 5-15 мг/л (для разных объектов и условий водоотведения). Такие концентрации определяются содержанием в воде эмульгированных нефтепродуктов. Поэтому в технологическую схему очистки нефтесодержащей льяльной (подсланевой) воды должны быть предусмотрены процессы, обеспечивающие ее очистку от эмульгированных нефтепродуктов. Наиболее распространенным способом очистки, который применяется для указанной цели, является адсорбция. Однако, применяются и другие, например, очистка окислением.

В процессах очистки воды, например, льяльной (подсланевой), образующейся при эксплуатации судов и других объектов морской техники, содержащей эмульгированные нефтепродукты применяется окисление озоном. Существует опыт использования озона в процессах очистки сточной воды, который показал высокую эффективность очистки воды, содержащей органическую субстанцию, окислением озоном, являющимся сильным окислителем [2,3,4]. Поэтому при поиске новых технологий очистки льяльной (подсланевой) воды исследователей не мог не заинтересовать вопрос о возможности применения окисления озоном в процессах очистки указанного вида судовых загрязнений [3,5].

**1. Особенности процесса очистки льяльной (подсланевой) воды от эмульгированных нефтепродуктов при окислении озоном**

Процесс очистки льяльной (подсланевой) воды от эмульгированных нефтепродуктов характеризуется своими особенностями, которые определяются следующими факторами. Первоначально реагирующие компоненты содержатся в разных средах. Озон – в газообразной среде – озono-воздушной смеси. Эмульгированные нефтепродукты находятся в воде. Это обстоятельство принципиально дает возможность организации процесса окисления нефтепродуктов, как в газообразной, так и в водной среде. Однако, анализ этих способов организации процесса окисления показывает, что целесообразно такой процесс осуществлять в водной среде, что подтверждает и общий опыт применения озона для очистки сточной воды в других областях. При этом, учитывая, что в очищаемой воде могут присутствовать и нефтепродукты, находящиеся в состоянии пленки или даже слоя, очистку от эмульгированных нефтепродуктов с использованием озона необходимо в общей технологии очистки предусматривать после удаления пленочных нефтепродуктов.

Весь процесс окисления эмульгированных нефтепродуктов включает в себя несколько стадий (рис.1). Процесс начинается с насыщения озона объема очищаемой воды. Эффективность этого процесса, которая характеризуется концентрацией растворенного в воде озона, зависит от площади раздела сред – газообразной и водной, через которую озон растворяясь, переходит в водную среду, температуры водной среды, давления и концентрации озона а озono-воздушной среде. Как правило, максимально возможную концентрацию

озона в очищаемой воде обеспечивают увеличением площади раздела сред, которое, в свою очередь, обеспечивается диспергированием озono-воздушной смеси в воде. Следующей стадией процесса очистки является диффузия озона в зону реакционного контакта, то есть к поверхности эмульгированных частиц нефтепродуктов. Скорость диффузии, а также концентрация озона и эмульгированных частиц нефтепродуктов определяет начало следующей стадии – окисления. Собственно процесс окисления как химическая реакция характеризуется своей кинетикой и протекает с определенной скоростью. Эмульгированная частица нефтепродуктов окисляется постепенно. Однако, как правило полностью окислиться не успевает и начинает коагулировать с другими частично окисленными частицами нефтепродуктов. Как показали экспериментальные исследования [6,7] процесс коагуляции протекает достаточно интенсивно и визуально наблюдается в виде образования бурой массы хлопьев и появления прозрачности очищаемой воды. При этом, как показывают расчеты процесса очистки окислением, приведенные ниже, скорость реакции окисления значительно снижается. Учитывая сказанное, а также то, что хлопьевидную массу частично окисленных нефтепродуктов можно выделить из объема фильтрованием, момент хлопьеобразования можно считать окончанием процесса очистки.

## 2. Кинетика окисления нефтепродуктов озоном

При проектировании устройств для организации процесса очистки нефтесодержащей льяльной (подсланевой) воды при окислении нефтепродуктов озоном необходимо знать время реакции  $T_p$ . Время реакции  $T_p$  является основным технологическим параметром, характеризующим исследуемый процесс. В свою

очередь, значение времени реакции при заданной производительности  $Q$  работы очистного устройства позволяет определить такой важный конструктивный параметр очистного устройства, как его объем  $W$

$$W = QT_p.$$

Время реакции  $T_p$  можно определить, решая уравнение

$$\frac{dn}{dt} = kC_1 C_2,$$

где  $n$  – концентрация нефтепродуктов или озона, прореагировавших к моменту времени  $t$ ;  $k$  – константа скорости реакции;  $C_1$  и  $C_2$  – текущие концентрации нефтепродуктов и озона, которые определяются, как

$$C_1 = a - n \text{ и } C_2 = b - n,$$

где  $a$  и  $b$  – начальные концентрации нефтепродуктов и озона

Решением этого уравнения при начальных условиях

$$t=0; n=0; C_1=a \text{ и } C_2=b$$

будет выражение

$$\frac{n}{a} = \frac{1 - \exp[k(a - b)t]}{1 - \frac{a}{b} \exp[k(a - b)t]}$$

При  $a=b$  последнее выражение принимает вид

$$\frac{n}{a} = \frac{k a t}{1 + k a t}$$

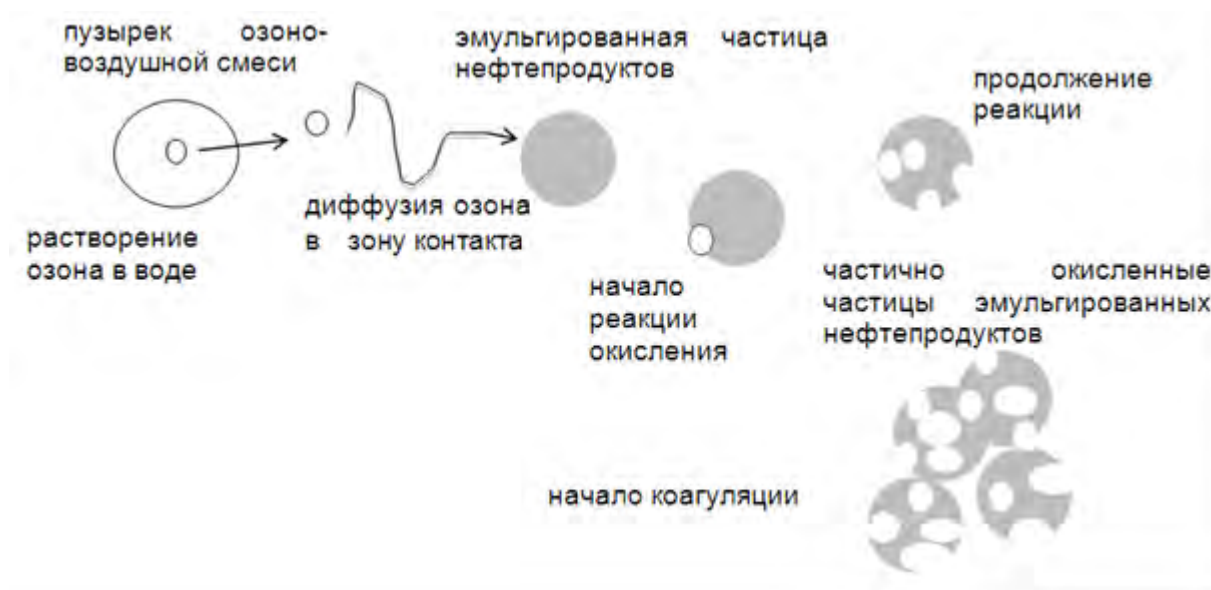


Рис. 1. Основные стадии процесса окисления эмульгированных нефтепродуктов озоном

Процесс окисления протекает до какого-то момента времени  $T_{пр}$ , при котором скорость превращения реагирующих веществ значительно

снижается и можно считать, что реакция практически заканчивается. Хотя это время, как правило, меньше времени  $T_p$ , значение времени  $T_{пр}$

можно использовать для расчета объема устройства.

Как видно из рис. 2, чем больше отношение  $b/a$ , то есть отношение начальной концентрации озона к начальной концентрации нефтепродуктов, тем эффективнее протекает процесс очистки – меньше время реакции при полном окислении нефтепродуктов –  $(n/a)_{\text{пр}} = 1$ . При отношении  $b/a < 1$   $(n/a)_{\text{пр}} < 1$ .

Время  $T_{\text{пр}}$  можно определить по формулам:

а) при  $a=b$

$$T_{\text{пр}} = A \exp(-Ba),$$

где  $A$  и  $B$  – (здесь и ниже) параметры, определяемые экспериментально для каждого из представленных случаев [5];

б) при  $a > b$

$$T_{\text{пр}} = A \exp \left[ B \left( \frac{b}{a} \right) \right],$$

в) при  $a < b$

$$T_{\text{пр}} = A \exp \left[ B \left( \frac{a}{b} \right) \right].$$

Как видно из приведенных зависимостей время реакции  $T_{\text{пр}}$  можно регулировать, меняя отношение начальных концентраций озона и нефтепродуктов. С учетом постоянного содержания концентрации эмульгированных нефтепродуктов в очищаемой воде такое регулирование обеспечивается изменением начальной концентрации озона. Однако, как показано на рис. 2 увеличение избытка озона приводят к повышению стоимости чистки. Кроме того, уменьшение времени реакции происходит до определенного значения и последующее увеличение начальной

концентрации озона уже практически не обеспечивает снижение времени реакции. С другой стороны при не значительном избытке озона время реакции может принимать значения больше, чем время естественного распада озона. Тогда часть озона будет распадаться, не успев вступить в реакцию с нефтепродуктами. Следовательно, отношение начальных концентраций должно иметь некоторое оптимальное значение. Это значение составляет 2,5-4,0.

Из рис. 2 одновременно видно, что остаточная концентрация нефтепродуктов в конце реакции тоже зависит от соотношения начальных концентраций озона  $b$  и нефтепродуктов  $a$  –  $b/a$ .

Если  $b \geq a$

$$\left( \frac{n}{a} \right)_{\text{пр}} = 1.$$

При  $b < a$

$$\left( \frac{n}{a} \right)_{\text{пр}} = \frac{b}{a}.$$

Экспериментальные исследования процесса очистки нефтесодержащей воды показали, что достаточно быстро (порядка нескольких минут) результатом процесса коагуляции является интенсивное хлопьеобразование. После контакта с озono-воздушной смесью, в очищаемой воде начинается интенсивная коагуляция частично окисленных озонoм нефтепродуктов. Одновременно начинают наблюдаться процессы естественного распада озона, а также его участие в реакции окисления нефтепродуктов, которые находятся в дисперсно-фазовом состоянии – в виде эмульгированных частиц.

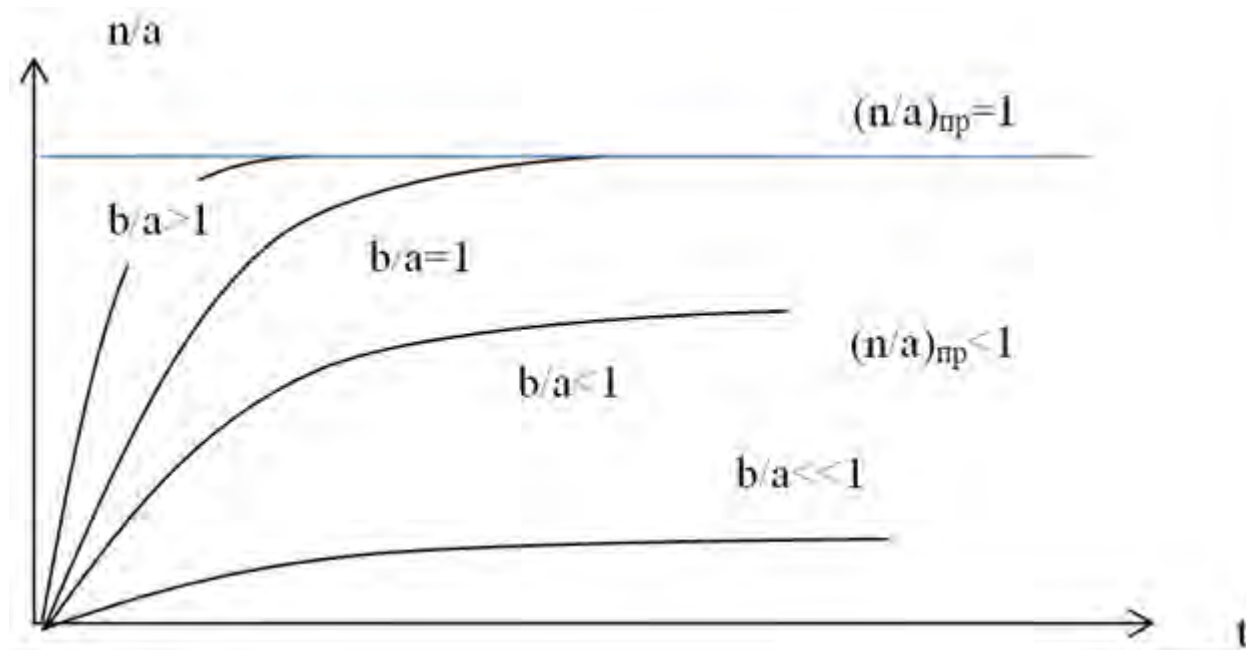


Рис. 2. Изменение концентрации эмульгированных нефтепродуктов в процессе окисления озонoм при разных значениях отношения начальных концентраций озона и нефтепродуктов

### Выводы

Исследования процесса очистки льяльной (подсланевой) воды окислением озоном, результаты которых представлены в настоящей работе, показали принципиальную возможность применения такого способа очистки нефтесодержащей воды, которая образуется при эксплуатации судов и других объектов морской техники. При этом исследования показали, что применение озона для указанных целей характеризуется определенными особенностями, которые необходимо учитывать при разработке технологии очистки и проектировании очистных устройств. Эти особенности определяются следующими основными причинами. Первоначально озон и окисляемые эмульгированные нефтепродукты находятся в разных средах. Кроме того, нефтепродукты находятся в дисперсно-фазовом состоянии. Исследованиями установлено, что скорость

реакции окисления снижается в процессе ее развития и доведение реакции окисления до полной деструкции нефтепродуктов требует значительных затрат времени. Однако, одновременно экспериментально было отмечено возникновение интенсивной коагуляции и образование хлопьевидной массы из частично окисленных нефтепродуктов. Указанные обстоятельства позволили рекомендовать при организации процесса очистки нефтесодержащей льяльной (подсланевой) воды окончанием процесса считать хлопьеобразование. Для удаления хлопьевидной массы в технологической схеме очистки необходимо предусмотреть фильтрование, которое эффективно справляется с такой задачей. В работе предложены аналитические зависимости, которые позволяют рассчитать наиболее важные технологические параметры процесса и один из основных параметров конструкции очистного устройства при заданной его производительности.

### Литература

1. Решняк В.И. Предотвращение загрязнения водоемов нефтесодержащей подсланевой водой при эксплуатации судов и судовых энергетических установок: моногр. СПб.: ГУМРФ им. адм.С.О.Макарова, 2011. 207 с.
2. Кульский Л.А., Гороновский И.Т., Когановский А.М., Шевченко М.А. Справочник по свойствам, методам анализа и очистке воды. Киев, 1980. 1206 с.
3. Курников А. С. Совершенствование систем обеспечения обитаемости и повышение экологической безопасности судов на основе активированных окислительных технологий: дис. ... д-ра техн. наук. Н. Новгород, 2002. 338 с.
4. Юсупхужаева А. М. Применение озона для доочистки промышленных сточных вод, прошедших биологическую очистку. Молодой ученый. 2017. №23.2. С. 14-16.
5. Решняк В.И., Курников А.С., Решняк К.В. Исследование особенностей процесса окисления в дисперсной системе «вода-эмульгированные нефтепродукты». Журнал Университета водных коммуникаций. 2010. № 3(7). С.171-177.
6. Решняк В. И. Основы очистки и утилизации нефтесодержащей воды в судовых энергетических установках: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1997. 385 с.
7. Каляуш А.И. Разработка комплекса специализированных судов и их СЭУ для очистки нефтесодержащей подсланевой воды: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2016. 157 с.

### References

1. Reshnyak V.I. Predotvrashhenie zagrjaznenija vodoemov neftesoderzhashhej podslanevoj vodoj pri jekspluatácii sudov i sudovyh jenergeticheskikh ustanovok: monogr. SPb.: GUMRF im. adm.S.O.Makarova, 2011. 207 s.
2. Kul'skij L.A., Goronovskij I.T., Koganovskij A.M., Shevchenko M.A. Spravochnik po svojstvam, metodam analiza i ochistke vody. Kiev, 1980. 1206 s.
3. Kurnikov A. S. Sovershenstvovanie sistem obespechenija obitaemosti i povyshenie jekologicheskoj bezopasnosti sudov na osnove aktivirovannyh okislitel'nyh tehnologij: dis. ... d-ra tehn. nauk. N. Novgorod, 2002. 338 s.
4. Jusuphuzhaeva A. M. Primenenie ozona dlja doochistki promyshlennyh stochnyh vod, proshedshih biologicheskiju ochistkuju. Molodoj uchenyj. 2017. №23.2. S. 14-16.
5. Reshnyak V.I., Kurnikov A.S., Reshnyak K.V. Issledovanie osobennostej processa okislenija v dispersnoj sisteme «voda-jemul'gированные нефтепродукты». Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij. 2010. № 3(7). S.171-177.
6. Reshnyak V. I. Osnovy ochistki i utilizacii neftesoderzhashhej vody v sudovyh jenergeticheskikh ustanovkah: dis. ... d-ra tehn. nauk. SPb., 1997. 385 s.
7. Kaljaush A.I. Razrabotka kompleksa specializirovannyh sudov i ih SJeU dlja ochistki neftesoderzhashhej podslanevoj vody: dis. ... kand. tehn. nauk. SPb., 2016. 157 s.

УДК 656.078: 004

## ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКЕ

**Ольга Леонидовна Домнина**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры логистики и маркетинга  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: o-domnina@yandex.ru

**Владимир Викторович Цверов**

Доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры логистики и маркетинга  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: v.tsverov@yandex.ru

**Александр Александрович Лисин**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры управления транспортом  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5  
e-mail: lisin@nn.sovfracht.ru

**Олеся Владимировна Чувиллина**

кандидат педагогических наук, доцент кафедры иностранных языков  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова 5  
e-mail: chuvilina@vsawt.com

### Аннотация

В статье анализируются перспективы развития транспортной логистики в Российской Федерации в области использования цифровых технологий. На основе анализа отечественного логистического и зарубежного опыта использования цифровых технологий (Великобритания, Германия, Китай, США, Япония) были проведены форсайт-исследования со следующими результатами: разработан прогноз развития цифровых технологий во всем мире, определены основные тенденции развития логистики и характеристики этих тенденций. При разработке прогноза использования цифровых технологий определены также угрозы и возможности для дальнейшего внедрения цифровых технологий в управление логистикой. Основным выводом, который был сделан по итогам исследования в отношении транспортной логистики в России, заключается в том, что ее развитию должно способствовать использование следующих передовых цифровых технологий: облачные сервисы, электронное управление цепочками поставок, блокчейн, 3D-печать, Bigdata, IoT. В статье изложены те цифровые технологии, которые могут привести к повышению эффективности логистических процессов при использовании их для решения конкретных задач. Сделан вывод о том, что для обеспечения эффективного использования указанных информационных технологий в деятельности транспортно-логистических компаний необходимо провести большую научно-методическую работу по разработке методов решения транспортных задач на основе цифровых технологий. В то же время научно-методические рекомендации должны учитывать специфику различных видов транспорта и регионов, что приводит к необходимому привлечению отраслевых институтов к этой работе.

**Ключевые слова:** транспортная логистика, цифровые технологии, блокчейн, телематика, облачные технологии, Интернет вещей (IoT), форсайты.

## FORECAST OF DIGITAL TECHNOLOGIES DEVELOPMENT IN TRANSPORT LOGISTICS

**Olga L. Domnina**

Associate Professor, Ph.D in Engineering Science,  
Associate Professor of the Department of Logistics and Marketing  
Volga State University of Water Transport,  
Nesterova St., 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation  
e-mail: o-domnina@yandex.rul.ru

**Vladimir V. Tsverov**

Associate Professor, Dr.Sci. in Economic Science  
Professor of the Department of Logistics and Marketing  
Volga State University of Water Transport,  
Nesterova St., 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation  
e-mail: o-domnina@yandex.rul.ru

**Alexander A. Lisin**

Ph.D in Engineering Science

Associate Professor of the Department of Transport management  
 Volga State University of Water Transport,  
 Nesterova St., 5, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation  
 e-mail: plastininae@yandex.ru

**Olesya V. Chuvilina**

Associate Professor, Ph.D in Pedagogical Science  
 Associate Professor of the Department of Foreign Languages  
 Volga state University of water transport  
 603950, Nizhny Novgorod, Nesterov str. 5  
 e-mail: nauka@vgavt-nn.ru

**Abstract**

The article analyses prospects for transport logistics development in the Russian Federation in the field of digital technologies use. Based on the analysis of national logistics and foreign experience in the use of digital technologies (UK, Germany, China, USA, Japan), foresight studies have been conducted with the following results: a forecast of digital technologies development worldwide has been worked out; main trends in logistics development and characteristics of these trends have been identified. While developing a forecast in the use of digital technologies, threats and opportunities for the further implementation of digital technologies in logistics management have also been defined. The main conclusion regarding transport logistics in Russia that has been drawn as a result of the study is that its development should be fostered by the use of the following advanced digital technologies: cloud services, electronic supply chain management, Blockchain, 3D printing, Bigdata, IoT. The article outlines those digital technologies, which could lead to an increase in the efficiency of logistic processes when used for specific tasks. It has been concluded that to ensure effective use of the above mentioned information technologies in the performance of transport and logistics companies, it is necessary to conduct a great deal of scientific and methodological work on the development of methods for solving transport problems on the basis of digital technologies. At the same time, scientific and methodological recommendations should take into account specifics of different modes of transport and regions, which leads to the required involvement of sectoral institutions for this work.

**Keywords:** transport logistics, digitization, blockchain, telematics, cloud technologies, Internet of things (IoT), foresights

**Introduction**

Once in two years the World Bank issues Logistics Performance Index (LPI) which analyzes the effectiveness of logistics development in different countries of the world taking into account the following criteria: infrastructure state, customs performance, international transportation organization, cargo movement tracking system, logistics and logistics competencies quality, delivery timeliness. In 2018 Russia in this ranking scored 2.76 points [1]. Table 1 shows a comparative assessment of the logistics services in Russia according to the reports of the World Bank in 2016 and in 2018.

Table 1

**Dynamics of Russian logistics services assessment according to the world bank**

Name of logistics services	Services assessment	
	2016	2018
General Score	2,57	2,76
Customs	2,01	2,42
Infrastructure	2,43	2,78
International Shipping	2,45	2,64
Logistics Quality	2,76	2,75
Cargo Tracking	2,62	2,65
Delivery Timeliness	3,15	3,31

As can be seen from Table 1, the overall score of the effectiveness of logistics in Russia increased, which allowed it to rise in rating from 99th place in 2016 to 75th place in 2018. Despite the increase in assessment in 2018, it is still significantly behind not

only developed countries, but even countries of the former USSR, such as Estonia (36th place), Lithuania (54th), Ukraine (66th), Latvia (70s) and Kazakhstan (71s) [1].

This lag is due to the inherent drawbacks in the transport and logistics industry. Let's analyze the main of them [2, 3, 4, 5, 6].

First, there are high logistic costs. On average, in developed economies, the share of logistic costs is about 12%, while in Russia the same indicator is about 19%. At present a commission for intermediary services in transport of goods on average constitutes about 10 - 45% of the total amount of an order [2, 3, 17].

Secondly, the share of 3PL-providers in the structure of logistics services market in Russia totals to 6%, while in the European Union and China this indicator fluctuates about 20% [2, 4, 5].

Thirdly, one of the drawbacks of Russian logistics market is irrational use of temporal and territorial resources. This concerns mostly large ports where shipping of goods exceeds time limit while being transported from rail to sea transport, which leads to an increase in delivery time [2].

Fourth, the problems of transport and logistics industry also result from instability of the economy due to extension of sanctions imposed by the EU and the US against Russia, and also due to instability of the ruble exchange rate against the euro and the dollar. This affects infrastructure development, international transportation and cost of services [2, 3].

Fifth, logistics deals with a huge document flow, which negatively influences the existing problems and affects the quality of logistics services [2, 3].



Sixth, there is significant deterioration of transport infrastructure and vehicles (in transport the depreciation of fixed assets is more than the average for the economy and totals to 57%) [6].

Seventh, there is insufficient development of the cargo tracking system [2].

The negative features of the national logistics industry described above leads to fairly high losses, which are redistributed by logistics companies to cargo owners.

These drawbacks are aggravated by the rapid development of innovative technologies in the work of foreign companies. Every year, Russian companies have less and less time to introduce new technologies into their work, as the share of innovative companies is growing worldwide. For example, looking at the total profit of the top 500 US corporations, the share of technologically advanced companies in 1997 accounted for 9%, and in 2017 it was already 17% [6]. Thus, if previously as a rule companies used innovations to gain a competitive advantage, in one particular field, now to gain a sustainable development in the logistics industry, it is necessary to use a complex approach, working in the areas of introduction of both product and process innovations and reshaping business models.

### 1. Research methods

One of the methods for long-term forecasting of scientific, technological and social development, allowing organizations and the state to make strategic decisions, is Foresight technology. It provides for the analysis of the main factors of change, development forecasts made by experts, analysis of the effects of changes for specific enterprises and projects [7]. This technology does not allow predicting the future with complete accuracy, but identifies current trends, emerging signals of changes. The technology helps to reduce the risks of taken decisions, which is used at present by international organizations, governments and companies. Foresight method can be used not only to develop government and corporate strategies, but also to assess financial investments on early stages. The results obtained from the use of the technology are often true, as they are based on an accurate assessment of what has already been done. Let's use this method for generalization and analysis of popular development trends in the field of transport logistics.

### 2. Research materials

Let us first use the data of the international operator DHL, which has developed the software, identifying the most demanded trends in logistics for the next 5-10 years [8]. They show that the following factors affect the future of logistics: new technologies, customer orientation, environmental sustainability and staff qualifications.

The development of technologies in logistics leads to increased productivity and reduced costs. The

desire to achieve this leads to the development of such trends as the Internet of things, the use of Blockchain technologies, added reality, Big Data; bionic improvement and others.

Customer centered approach leads to increased customer satisfaction of logistics services users. This can include such trends as omnichannel logistic solutions, single consignment of goods, convenient logistics, multi-purpose networks, on-demand delivery, rapid response technology and others.

The need to stick to environmental sustainability becomes a prerequisite for the work of the logistics industry, which is caused by the requirements of state bodies. This results in such logistic trends as, for example, fair and responsible logistics.

Personnel qualifications, despite the current trend in robotization and automation in logistics, determines the increased requirements for personnel. New technologies will assist in the implementation of routine tasks. This will lead to an increase in productivity, a reduction in time required to complete certain tasks, and will allow employees to concentrate on the complex tasks associated with information analysis, managerial decision-making and innovation. The need to solve these problems leads to the need for improvement of the education quality, conformity with its technical profile and the need for continuous staff development.

The newest trends in logistics industry are impossible without innovations in the development of digital technologies.

As the experience of the leading countries shows, digitalization leads to a significant increase in the operational productivity of logistics companies in the following areas [6]:

- increase of research and development efficiency of new services (improvement of existing ones), since automated analysis of large data allows taking into account consumer demands, thereby improving the quality of services provided;
- optimization of logistic operations through automated control in real time, route optimization, increased productivity, shorter delivery times, etc. ;
- efficient use of resources leading to reduction of logistics costs.

Governments of different countries show great interest in digital technologies. They see them as a potential for increasing productivity and economic growth, creating new markets for the provision of new logistics services or services provided on completely new conditions. The digitization of logistics can also serve as a source of a significant increase in the efficiency of resources use, a reduction in transport and logistics costs, and an increase in business sustainability.

Let us examine the features of different governments' approaches to expand the use of digital technologies on the example of such advanced economies as the USA, Germany and Japan. These examples demonstrate the key national priorities of a country (Table 2).

Table 2

**Approaches of different countries governments to expand the use of digital technologies  
[based on data 13, 14, 15]**

Country	Features	Focus
The USA	Digital Manufacturing & Design Innovation Institute (DMDI), Chicago. Research activities focus on “digital thread” and efforts to integrate data from various, traditionally discrete sources; functional engineering perspectives through development of protocols, information exchange methods, tools and standards; opportunities to increase revenue especially through internet platforms and big data analysis	Focus on opportunities based on new product design (and prompt launch), knowledge management, including “Big data”
Germany	“This OWL” cluster initiative (Smart Engineering Systems) concerns Industry 4.0. OWL has received over € 100 million over five years to fund 46 research projects on the development of intelligent technical systems.	Emphasis on “embedded systems” and “smart” factories of the future
Japan	The Japanese Council on the initiative of Robot Revolution, supported by more than 200 companies, universities and research institutes develops a concept of “robots for the Internet of Things era”. In March 2017 Japanese Prime Minister Shinzo Abe presented a concept of Industry 5.0 at the exhibition Ce Bit in Hannover.	Emphasis on cyber-physical systems and advanced robotics for IoT era
The UK	Advanced Manufacturing Supply Chain Initiative and a network of R&D centers have been developed. The share of the digital economy in GDP was 18% in 2016. Multipurpose technologies have been identified: advanced materials; satellites; energy storage; robotics; agro-science; regenerative medicine; big data; synthetic biology.	Focus on long-term strategic support for key sectors through the implementation of coordinated development of skills and capabilities
China	75 zones of new high technologies have been created that joining together effort of science, education, industry and business to achieve strategic goals.	Focus on gaining the role of the world’s leading technology power

Thus, despite the difference in approaches, all the countries in question are investing in the development of new digital technologies.

The Decree of the RF President of May 7th, 2018 “On the national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024” provides for at least three times increase in domestic expenditures on development of digital economy before 2024 [13]. Thus, in general, for the period from 2017 to 2030, contribution of information industry into GDP growth will be almost 4%, and digitization of economic sectors will be about 30%.

According to a study conducted by McKinsey, Russia has significant potential in the development of digital logistics. According to forecasts, digitalization of the economy will allow Russia to increase GDP by 4.1–8.9 trillion rubles by 2025, of which 3.4 trillion rubles can be got from the digitization of logistics operations [14].

Realizing the need to improve the competitiveness of the national economy, the President of the Russian Federation has set goals to gain priority in research and development, a high rate of development of new knowledge and development of innovative products. These tasks can be accomplished by: “cohesiveness of the territory of the Russian Federation through the creation of intelligent transport systems, as well as gaining leadership in the creation of international transport systems” [11].

So the use of modern digital technologies in logistics is a target factor in increasing the economic competitiveness of the country. In addition to the above, it should also be noted that the development of digital technologies in international logistics may reduce the impact of sanctions against the Russian Federation.

A survey of leading national logistics companies about the prospects for using new trends in digital logistics has revealed the following: the majority of respondents (73%) believe that the introduction of digital logistics, despite the cost, will help to further

increase in profit. Moreover, the majority of respondents consider the introduction of digital technologies as one of the most effective methods to increase the profitability of their business (64% of respondents) [15].

The most promising trends in digital logistics are the following: Big data; Internet of Things; e-SCM; 3D-printing; Cloud Services; Blockchain.

Big data is a set of computer tools and methods for processing a variety of (structured and unstructured) data of large volumes to obtain human-perceived results that are difficult to process using conventional methods. Data bulk can be analyzed from different sources: Internet documents, blogs and social networks, audio / video sources, measuring devices, etc. As a result of analyzing and processing such data bulk, you can analyze your own logistics business, study competitors and learn new information about your customers. As a result, with the help of big data, it is possible to control the quality of logistics services, reduce logistics risks, reduce costs. Every year, the bigdata software market for collecting and analyzing grows by 32% [2].

The Internet of things (IoT) is the concept of interaction and cooperation of various objects and things to achieve their goals through tags, sensors, mobile phones, etc. For example, automatic systems for collecting fines and alerts about accidents and traffic jams. It is predicted that by 2020 more than 50 billion devices will be connected to the Internet [12]. And these are certain opportunities for development, including logistics. Smart devices connected in the same information space can store important data — for example, technical requirements, customer names, and shipping addresses. Smart pallets and long distance shipping containers will make it much easier to track the goods being transported or to identify them in stock. They can not only make location, distribution and dispatch of orders easier for the logistics services of a company, but also help manufacturers more efficiently perform technical maintenance and

processing of goods at the end of their service life. To make the Internet of things function, three conditions are necessary –the existence of a single control center, the use of a single standard and the security of data transmission. In this case, the presence of a human being in the transfer of data is excluded. Instead, it uses a smart device that distributes commands between devices.

E-SCM (electronic supply chain management) is an approach to managing key business processes in supply chains, aimed at increasing the level of interaction of objects and processes in supply chains, as well as a set of information technologies for the purpose of information integration and increasing the efficiency of all participants. According to the data of the largest analytical companies (AMR Research, Forrester Research), thanks to e-SCM, logistics companies could gain the following competitive advantages: profits grow by 5-15%; order processing time and its cost are reduced by 20-40%; time to launch is reduced by 15-30%; procurement costs are reduced by 5-15%; warehouse stocks decrease by 20-40%; production costs are reduced by 5-15% [12].

3D printing is a layer-by-layer “growing” solid three-dimensional object. Global analysts [13, 14, 15] forecast development prospects in the 3D printing industry. Over the next four years, a huge market growth is expected. “The existing potential of the technology lies in the possibility of simplifying the production of high-tech, customizable products and spare parts, and this, in turn, can bring logistics and production as close as possible,” said Matthias Hegger, Senior Vice-President in solutions for customers and innovations at DHL [2]. According to the estimates of AEB International, a company that develops IT logistics solutions, about a third of products has 3D printing elements. In the next 4 years, this indicator is expected to grow to 80%. 3D printing will fundamentally change logistics in the following ways:

- approaching sales markets and increasing customer satisfaction through decentralization of production and transfer of manufacturing process to the regions;
- minimization of the need for delivery by transferring production to the regions;
- minimization of the need for storage due to the possibility of printing according to consumer requests on the printer using an electronic layout.

Cloud services is a model of providing access to data through a server, which the user can quickly use by minimizing interactions with the service provider or their management efforts. They include three service models: Cloud Software as a Service (SaaS) - cloud software, Cloud Platform as a Service (PaaS) - a cloud

platform; Cloud Infrastructure as a Service (IaaS) - cloud infrastructure. That is, cloud services for companies are often business automation applications distributed via the SaaS model through a public cloud and available to a wide range of customers at an affordable price. They are widely used by IT companies to manage logistics business processes.

According to research and consulting firm Gartner [2], IaaS will be the fastest growing market segment. Projected growth in 2019 will be 27.6% to compare data in 2018. By 2022, Gartner expects that 90% of enterprises consuming IaaS public cloud services will use IaaS and PaaS and their capabilities shared by one provider.

The Blockchain technology (or distributed registry system) is a mathematical algorithm that records who acquires what. With the help of this technology you can track the entire supply chain of goods from the manufacturer to the consumer. Each delivery transaction is recorded and added to the distributed database chain and a unique multi-digit numeric cipher is assigned. At the same time, the added fragment saves data on time, date, participants, transaction amount and the entire network. The information entered into the system cannot be changed, and its storage is carried out without centralized management. Here, any information transfer occurs in the form of a chain of blocks, in which each subsequent block always contains information about the previous block.

According to experts, conducted by the Global Blockchain Business Council (GBBC), 40% of institutional investors believe that the blockchain can become the most revolutionary technology after the Internet [2,3]. In general, according to the Digital Supply Chain Institute (hereinafter referred to as DSCI), which has conducted its own research of professionals supply chain and has found out that about 35% of surveyed logistics companies are exploring the possibility of using the blockchain in their work, and another 31% think about the need to use it. Such interest in blockchain among logistics specialists is due to the following reasons: 10% of respondents believe that the blockchain will change logistics logically, 33% of respondents see in its use creating competitive advantages for their companies [8, 10].

### 3. Results

Using the foresight technology in the development of global trends in the use of digital technologies, we are going to make a forecast for the development of these technologies in the world and the directions of priority development in Russian logistics (Table 3).

Table 3

Forecast of the development of digital technologies in logistics				
Period	Predicted event	Promising Technologies	Threats	Results
till 2024	The beginning of digital technologies integration into logistics	Internet technologies (automation of business processes based on cloud technologies, modeling processes)	Massive staff reduction; dependence of transport organizations on access to the Internet and software	Reduction in the number of intermediaries; cost savings; reduction of workflow
2025-2035	Use of digital technologies by most logistics companies	Digital technologies (Blockchain, bigdata etc.)	Disappearance of logistics companies not widely using digital technologies from the market	Optimization of business processes, their reengineering
2036-2050	Development of new digital technologies	New more advanced technologies	Full dependence of companies on digital technologies	Absolute transparency of logistics; online access to information for all participants

**Conclusion**

The development of the promising technologies described above can significantly improve the efficiency of most of the tasks solved in transport logistics.

Table IV shows the tasks of the functions in transport logistics [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18] with reference to the possibility of using promising technologies for their solution and, accordingly, to increase their efficiency.

Table 4

Directions of digital technologies use in transport logistics	
Tasks	Promising technologies to improve the task performance
Development of delivery routes. Justification of supply chain. Selection of partners in supply chain. Selection of vehicles. Choice of a rental vehicle company. Justification of delivery time and costs.	Cloud services, electronic supply chain management
Development of shipping management systems "just in time"	Blockchain technology, 3D printing, electronic supply chain management, IoT
Technological process control in the departure point, in transit, in transshipment points, in the destination. Monitoring and shipping tracking. "Door-to-door " and "just-in-time" shipping management	Cloud services, electronic supply chain management, IoT
Analysis of obligations performance by executors	Blockchain technology
Information and documentary support	Cloud services, electronic supply chain management
Regulatory support	Cloud services
Technological interaction	Blockchain technology, cloud services, electronic supply chain management, big data
Financial interaction	Blockchain technology, cloud services, electronic supply chain management
Legal support	Blockchain technology, cloud services
Development of a network of terminal and logistics centers. Development of transport corridors.	Big data, internet of things

It should be taken into consideration that a lot of scientific and methodological work is needed to develop methods for solving transport problems, taking into account promising technologies listed in Table IV. At the same time, these scientific and methodological developments should be connected to the peculiarities of different modes of transport and regions, which

requires the involvement of sectoral institutions for this work.

Thus, the expansion of digital technologies encourages transport companies to analyze their market opportunities and explore the competitive environment to determine the potential for their growth.

**Acknowledgment**

This project has been funded with support from the European Commission. This publication reflects the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

### Литература

1. International LPI, in press // <https://lpi.worldbank.org/international/global>
2. Домнина О.Л., Курманов А.В., Фомичев М.Н. Концепция применения технологии блокчейн в транспортной логистике // Экономика и предпринимательство. 2018. №6(95). с.1156-1163
3. Дмитриев А.В. Цифровизация транспортной логистики. Монография // СПб, 2018. - 162 p.
4. Берман Н.Д. Цифровизация логистики: применение технологии "blockchain"/ International Journal of Advanced Studies. 2018. Т. 8. № 1-2. С. 21-28.
5. Third-Party Logistics Consulting and Market Research. Режим доступа <http://www.3plogistics.com/> (Дата обращения: 13.02.2019 г.)
6. Данные Росстата. Степень износа основных фондов// [http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/fund/#](http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/fund/#) (Дата обращения: 13.01.2019 г.)
7. Kryukov S.V. Foresight: from prediction to shaping the future / Terra Economicus. 2010. Т. 8. № 3-2. p. 7-17
8. Karapetyants, I. Kostuhin, Y., Tolstykh, T., Shkarupeta, E., Syshhikova, E. Transformation of logistical processes in digital economy/ Proceedings of the 30th International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2017 - Vision 2020: Sustainable Economic development, Innovation Management, and Global Growth Volume 2017-January, 2017, Pages 838-844
9. Shneps-Shneppe M.A., Kupriyanovskiy V.P., Namiot D.E., Seleznev S.P. Telecommunications as a crucial link in the digital economy. US experience // International Journal of Open Information Technologies. 2017. Т. 5. № 5. S. 25-33.
10. Molina, R. The digital revolution of the sea: The ports of the future. Revista de Obras Publicas Volume 165, Issue 3604, December 2018, Pages 66-71
11. Kupriyanovskiy V.P., Evtushenko S.N., Dunaev O.N., Drozhzhinov V.I., Namiot D.E. Decision making in a digital economy. UK experience // International Journal of Open Information Technologies. 2017. Т. 5. № 4. S. 63-73.
12. Аптекман А., Калабин В., Клинов В., Кузнецова Е., Кулагин В., Ясеновец И. Цифровая Россия: Новая реальность. Отчет McKinsey & Company, // <https://www.mckinsey.com/ru/~ /media/McKinsey /Locations/Europe%20and%20Middle%20East/Russia/Our%20Insights/Digital%20Russia/Digital-Russia-report.ashx>
13. Цифровая повестка Евразийского экономического союза до 2025: перспективы и рекомендации. // <http://www.eurasiancommission.org/ru/act/dmi/SiteAssets/%D0%9E%D0%B1%D0%B7%D0%BE%D1%80%20%D0%92%D0%91.pdf>
14. 2017 Global Digital IQ® Survey, in press// <https://www.pwc.ru/en/publications/digital-iq.html>
15. Witthaut, M., Deeken, H., Sprenger, P., Gadzhanov, P., David, M. Smart objects and smart finance for supply chain management/ Logistics Journal Volume 2017, 16 October 2017
16. Digital Planet 2017: How Competitiveness and Trust in Digital Economies Vary Across the World, in press // <https://sites.tufts.edu/digitalplanet/dei17/>
17. Hakan G. An empirical modelling framework for forecasting freight transportation // Transport. 2014. N. 29. pp. 185–194
18. Lukinskiy V.S., Dragomirov V. Methods of evaluating transportation and logistics operations in supply chains // Transport and Telecommunication, 2016. – volume 17. – no. 1. – P.55–59
19. Tadashi Y., Zukhruf F. Freight transport network design using particle swarm optimization in supply chain–transport super network equilibrium // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 2015. – Vol. 75 (3). – pp. 164–187.

### References

1. International LPI, in press // <https://lpi.worldbank.org/international/global>
2. Domnina O.L., Kurmanov A.V., Fomichev M.N. The concept of blockchain technology in transport logistics // Economy and Entrepreneurship. 2018. №6(95). p.1156-1163
3. Dmitriev A.V. Digitalization of transport logistics. Monograph // St. Petersburg, 2018. - 162 p.
4. Berman N.D. Digitalization of logistics: the use of technology "blockchain"/ International Journal of Advanced Studies. 2018. Т. 8. №1-2. p. 21-28.
5. Third-Party Logistics Consulting and Market Research in press// <http://www.3plogistics.com/>
6. Third-Party Logistics Consulting and Market Research// <http://www.3plogistics.com/>
7. Kryukov S.V. Foresight: from prediction to shaping the future / Terra Economicus. 2010. Т. 8. № 3-2. p. 7-17
8. Karapetyants, I. Kostuhin, Y., Tolstykh, T., Shkarupeta, E., Syshhikova, E. Transformation of logistical processes in digital economy/ Proceedings of the 30th International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2017 - Vision 2020: Sustainable Economic development, Innovation Management, and Global Growth Volume 2017-January, 2017, Pages 838-844
9. Shneps-Shneppe M.A., Kupriyanovskiy V.P., Namiot D.E., Seleznev S.P. Telecommunications as a crucial link in the digital economy. US experience // International Journal of Open Information Technologies. 2017. Т. 5. № 5. S. 25-33.
10. Molina, R. The digital revolution of the sea: The ports of the future. Revista de Obras Publicas Volume 165, Issue 3604, December 2018, Pages 66-71
11. Kupriyanovskiy V.P., Evtushenko S.N., Dunaev O.N., Drozhzhinov V.I., Namiot D.E. Decision making in a digital economy. UK experience // International Journal of Open Information Technologies. 2017. Т. 5. № 4. S. 63-73.

12. Aptekman A., Kalabin V., Klintsov V., Kuznetsova E., Kulagin V., Yasenovets I. Digital Russia: a new reality. Report McKinsey&Company, in press / <https://www.mckinsey.com/ru/~ /media/McKinsey/Locations/Europe%20and%20Middle%20East/Russia/Our%20Insights/Digital%20Russia/> Digital-Russia-report.ashx
13. Digital agenda of the Eurasian Economic Union until 2025: prospects and recommendations. Overview in press // <http://www.eurasiancommission.org/ru/act/dmi/SiteAssets/%D0%9E%D0%B1%D0%B7%D0%BE%D1%80%20%D0%92%D0%91.pdf>
14. 2017 Global Digital IQ® Survey, in press// <https://www.pwc.ru/en/publications/digital-iq.html>
15. Witthaut, M., Deeken, H., Sprenger, P., Gadzhanov, P., David, M. Smart objects and smart finance for supply chain management/ Logistics Journal Volume 2017, 16 October 2017
16. Digital Planet 2017: How Competitiveness and Trust in Digital Economies Vary Across the World, in press // <https://sites.tufts.edu/digitalplanet/dei17/>
17. Hakan G. An empirical modelling framework for forecasting freight transportation // Transport. 2014. N. 29. pp. 185–194
18. Lukinskiy V.S., Dragomirov V. Methods of evaluating transportation and logistics operations in supply chains // Transport and Telecommunication, 2016. – volume 17. – no. 1. – P.55–59
19. Tadashi Y., Zukhruf F. Freight transport network design using particle swarm optimization in supply chain–transport super network equilibrium // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 2015. – Vol. 75 (3). – pp. 164–187.

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

УДК 004.75

### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СУДОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ В СРЕДЕ SIMINTECH**

**Сергей Петрович Хабаров**

Кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С. М. Кирова 194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5.  
тел. (905) 256-66-57 e-mail: serg.habarov@mail.ru

**Андрей Григорьевич Шпекторов**

Кандидат технических наук, доцент кафедры корабельных систем управления Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.  
тел. (921) 314-96-23 e-mail: agshpektorov@etu.ru

#### **Аннотация**

В настоящее время судовые системы управления техническими средствами являются распределенными, что обуславливает необходимость исследования не только алгоритмов управления, но также информационного взаимодействия между объектом управления, датчиками, управляющими приборами и исполнительными органами. Информация о состоянии объекта и о командах управления в распределенных системах может передаваться на большие расстояния с использованием различных каналов и протоколов взаимодействия, влияющих на работу системы управления в целом.

В статье рассматривается технология проектирования и анализа распределенных систем управления, основанная на применении пакета SimInTech. На примере проекта модели управления уровнем жидкости в цистерне изложен принцип моделирования систем в пакете SimInTech. Описаны способы декомпозиции проекта, позволяющей реализовать распределенную структуру системы управления, как на уровне виртуальных машин на одном компьютере, так и на уровне разных компьютеров. Показаны особенности влияния протокола информационного взаимодействия на декомпозицию и процедуру настройки распределенного проекта. Приведены результаты имитационного моделирования.

**Ключевые слова** системы управления техническими средствами, протоколы сетевого взаимодействия, SimInTech, протокол TCP, протокол UDP.

### **DISTRIBUTED INTEGRATED MARINE AUTOMATION SYSTEMS DESIGN AND RESEARCH IN SIMINTECH ENVIRONMENT**

**Sergei P. Khabarov**

PhD, associate professor of the Department of Information Systems and Technologies  
St. Petersburg State Forest Technical University  
Institutskii lane, 5, St. Petersburg, 194021, Russian Federation  
Tel. (905) 256-66-57 e-mail: serg.habarov@mail.ru

**Andrei G. Shpektorov**

PhD, associate professor of the Department of Ship Control Systems  
St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"  
Street Professor Popova, 5, St. Petersburg, 197376, Russian Federation  
Tel. (921) 314-96-23 e-mail: spect\_ag@mail.ru

#### **Abstract**

At present, Integrated Marine Automation Systems are distributed, which makes it necessary to study not only control algorithms, but also information interaction between control objects, control means, sensors and controllers. State information and control commands in distributed systems can be transmitted over long distances using various channels and interaction protocols that affect the operation of the control system as a whole.

The article considers the technology of design and analysis of distributed control systems based on the use of the SimInTech software. With the example of a model project for controlling the liquid level in a tank, the principle of simulating in SimInTech is described. Decomposition of the project allowing to realize the distributed structure of the control system is observed. Operation of the distributed system on the virtual machines in one computer and on the different computers is demonstrated. The features of the influence of the protocol of information interaction on the decomposition and procedure for setting up a distributed project are shown. Simulation results are presented.

**Key words** Integrated Marine Automation Systems, networking protocol, SimInTech, TCP communication, UDP communication

### Введение

Для современного этапа построения судовых систем автоматизации характерным является переход к распределенной структуре, объединяющей в себе вычислительные приборы, множество контроллеров с подключаемыми к ним интеллектуальными датчиками. При этом все эти компоненты взаимодействуют между собой с использованием различных каналов связи и интерфейсов, обладающих определенной пропускной способностью и скоростями передачи. В этих условиях необходимо на стадии проектирования систем проводить их имитационное моделирование, для которого в настоящее время используются такие пакеты, как MATLAB, SimInTech [1] и OMNeT++[2].

Основным направлением использования SimInTech [3] является создание моделей объектов управления и разработка алгоритмов управления с возможностью их отладки и генерации готового кода для ряда программируемых контроллеров. Пакет SimInTech может быть использован для исследования нестационарных процессов в системах автоматического управления, в следящих приводах и роботах, фактически в любых технических системах [4,5], описание динамики которых можно представить в виде системы дифференциально-алгебраических уравнений и/или реализовать методами структурного моделирования, в том числе и при разработке судовых систем управления техническими средствами (СУТС) [6]. Особенность СУТС состоит в том, что, обладая явно распределенной структурой, они требуют не только исследования алгоритмов управления, но также анализа протоколов взаимодействия между отдельными компонентами системы.

В данной статье рассматривается технология использования пакета SimInTech для проектирования и анализа распределенной системы управления. С этой целью на базе уже готового и работоспособного проекта рассматриваются возможные подходы к его декомпозиции путем введения в его состав реализованных в пакете SimInTech блоков UDP и TCP серверов и клиентов. Показано, как на основе выполненных модификаций исходного проекта осуществить переход к комплексной SimInTech модели и выполнить сетевое тестирование распределенного проекта.

### 1. Реализация простой модели системы управления в среде SimInTech

Для иллюстрации технологии моделирования распределенных систем в качестве исходной будет использована простейшая модель управления уровнем жидкости в цистерне. Выбор этой модели обусловлен тем, что она наиболее часто используется в составе СУТС, входя составной частью в балластную и топливную системы. В составе такой модели, разработанной и отлаженной для SimInTech (рис. 1), можно выделить три составные части, а именно:

1) Объект управления (цистерна), модель которой представлена уже разработанным для SimInTech анимированным блоком, который по заданной геометрии цистерны, времени работы входного клапана и величине объемного расхода жидкости рассчитывает объем поступившей жидкости. Кроме этого модель также вычисляет объем истекающей самотеком жидкости в зависимости от времени открытия выходного клапана и площади сечения сливной трубы. В процессе работы модель формирует сигналы о достижении предельно допустимых уровней.

2) Исполнительные органы (впускной и выпускной клапаны) также представлены анимированными блоками, которые моделируют работу простейшего возвратного клапана, при подаче на который сигнала управления он начинает открываться с некоторой заданной из его технических характеристик скоростью. При снятии сигнала управления он с той же скоростью возвращается в закрытое состояние. При этом предполагается, что клапан формирует сигналы о достижении им двух конечных состояний или сигнала тревоги в иных случаях.

3) Система управления, в которой реализован простейший алгоритм формирования управляющего сигнала на клапан на основе отклонения текущего уровня жидкости в цистерне от заданного уровня. Предусмотрена блокировка одновременной работы двух клапанов, реализованная на RS-триггерах.

Во избежание существенного перелива по сравнению с заданным уровнем система позволяет устанавливать зоны нечувствительности на формирование управляющего сигнала. Выбор величины зоны нечувствительности существенного зависит, как от скорости перемещения клапана, так и от объемного расхода поступающей жидкости.



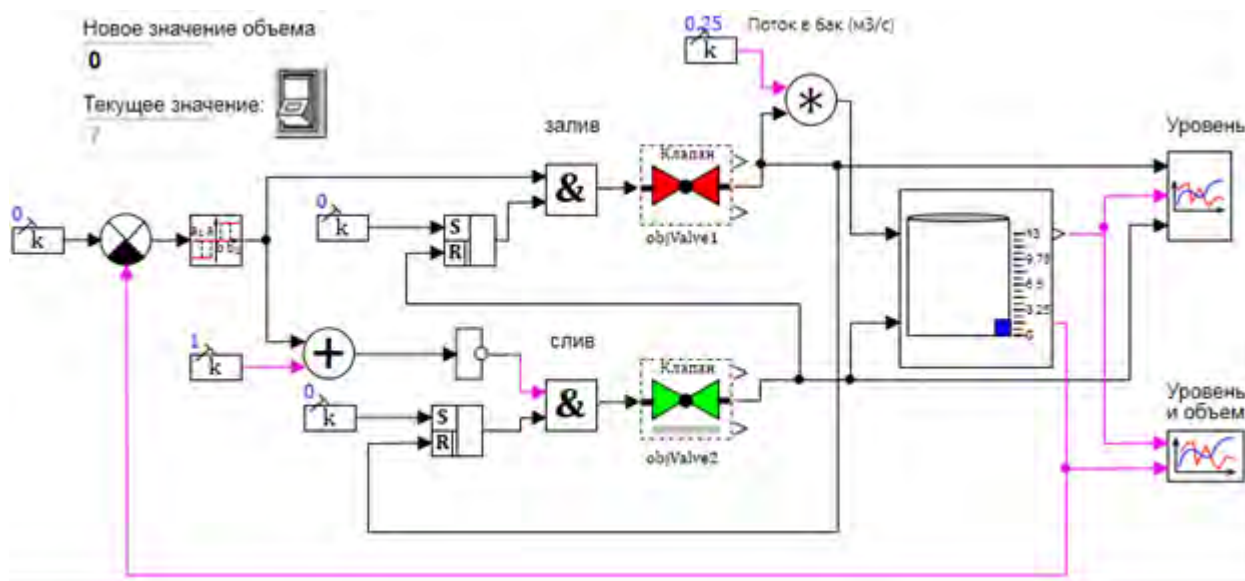


Рис. 1. Исходная модель управления уровнем жидкости в цистерне

При допущениях, что объемный расход поступающей жидкости ( $P$ ) постоянен, эффективное сечение клапана за время его открытия ( $T_k$ ) изменяется линейно во времени, состояние клапана эквивалентно пропускной способности, то значение зоны нечувствительности можно определить из следующего выражения:

$$dV = \int_0^{T_k} P dt + \int_0^{T_k} P k t dt = P \left( T_k - \frac{1}{T_k} \frac{T_k^2}{2} \right) = P \frac{T_k}{2}.$$

Следует отметить, что для ряда систем может оказаться и достаточным использование постоянной зоны нечувствительности, но реализация в алгоритме адаптивной настройки зоны нечувствительности позволяет значительно повысить точность поддержания заданного уровня жидкости в цистерне, а это для ответственных систем может оказаться одним из основных требований. Исследование исходной модели в среде SimInTech показало результаты, хорошо согласующиеся с натурными данными. В частности, при моделировании процесса изменения заданного объема жидкости в пределах  $20 \rightarrow 10 \rightarrow 15 \rightarrow 7.5 \rightarrow 10 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \text{ м}^3$  при времени срабатывания клапанов 15 с и 5 с соответственно, были получены результаты, представленные на рис. 2.

Результаты имитационного моделирования системы получены в предположении, что управляющие сигналы на исполнительные органы, как и сигналы обратных связей в систему управления поступают практически мгновенно. Подобная идеализация допустима для систем с относительно простой структурой. В реальных системах сигналы от контроллера, в котором реализован алгоритм управления, до исполнительного устройства проходят через разветвленную сеть, включающую маршрутизаторы, контроллеры и модули ввода/вывода. Поэтому актуальной является задача моделирования этих процессов на вычислительной машине раздельно, а в перспективе – моделирования процессов на

отдельных виртуальных или реальных компьютерах.

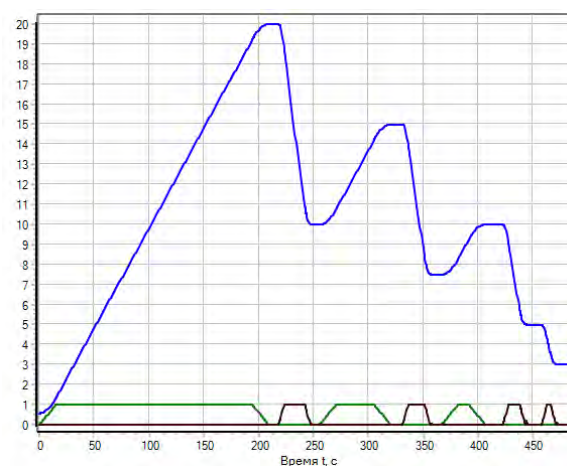


Рис. 2. Моделирование процесса программного заполнения и слива жидкости

## 2. Организация проектирования распределенной системы через UDP-протокол

Полноценная организация распределённого сетевого расчёта в SimInTech с обменом данными через сеть и синхронизацией модельного времени реализуется функциями базы данных сигналов SDB и присутствует во всех библиотеках. Однако наличие в системе таких блоков, как UDP сервера и клиенты, позволяет для простейших систем разрабатывать проекты, которые могут запускаться на разных узлах и обмениваться между собой нужной информацией.

В рассмотренном примере явно присутствуют как модели объекта управления, так и модели исполнительных органов и алгоритмов управления. Совокупность отдельных объектов управления может представлять собой обобщенную модель исследуемого объекта. Она мало зависит от того, будет ли использоваться ручное или автоматическое управление, а больше зависит от

тех или иных физических параметров используемого оборудования. В этих условиях более предпочтительным будет хранение общей модели физического объекта или процесса на одних компьютерах, а алгоритмов управления на других. При этом следует отметить, что с каждой из этих моделей работают и специалисты совершенно разных специальностей. Поэтому общая декомпозиция упростит и их работу.

Рассмотрим реализацию этого подхода на примере использования двух виртуальных машин, сетевые настройки которых позволяют осуществлять обмен данными как между собой, так и с базовым компьютером по IP протоколу. Пусть IP-адреса виртуальных машин, работающих в среде

Oracle VM VirtualBox, имеют адреса 192.168.56.101 и 192.168.56.102, соответственно.

В качестве базового используется исходный проект, в котором явно выделяются две его части: объект управления и блок управления. Между этими частями проекта организуется дуплексный канал обмена данными, который формируют две пары блоков «Мультиплексор» / «Демультимплексор».

Канал от блока управления к объекту управления настроен на передачу вектора из двух элементов типа Byte, а в обратную сторону передается вектор из трех элементов типа Double. Модифицируем схему, заменив сформированные ранее линии связи парой UDP-клиент/UDP-сервер (рис. 3).



Рис. 3. Схема проекта с двумя UDP-каналами и его декомпозиция.

Таким образом, дуплексная связь между двумя основными частями системы организуется с помощью двух разнонаправленных UDP-каналов. Параметры настройки блоков UDP-клиентов для проекта на виртуальной машине с адресом 192.168.56.101, показаны на рис. 4.

Свойства: UDPClient1		
Свойства	Общие	Порты
Название	Имя	Значение
Типы данных	typese	Byte:
Размерности данных соответствующие тип	dimension	[2]
Массив начальных значений выходов	y0	[0]
Адрес сервера	hostname	192.168.56.101
Порт ip	port	6501

Свойства: UDPClient2		
Свойства	Общие	Порты
Название	Имя	Значение
Типы данных	typese	Double:
Размерности данных соответствующие тип	dimension	[3]
Массив начальных значений выходов	y0	[0]
Адрес сервера	hostname	192.168.56.101
Порт ip	port	6502
Тип протокола	u_prot	Простой
Имя фильтра пакета для протокола Миль	wrasc	Coc_Mod
Название пакета в заголовке протокола M	wrasc	car

Рис. 4. Параметры настройки свойств UDP-клиентов

На стадии декомпозиции из исходного проекта системы формируются два отдельных проекта, в соответствии с линией разделения, показанной на рис 3. Также, для проекта, описывающего объект

управления желательно добавить временный график для контроля работы проекта и вывода значения текущего объема цистерны и положение каждого из клапанов (рис. 5). Проект, описывающий алгоритмы управления, можно оставить без изменения (рис. 6).

С учетом расположения проектов на разных виртуальных машинах необходимо провести соответствующую настройку. Для этого нужно:

- исправить скрипт блока управления, так как в нем значение текущего объема было определено через свойство объекта (цистерны), который был исключен в ходе декомпозиции. За обмен данными через пару «Мультиплексор» / «Демультимплексор» отвечает объект «Математическая связь», которому необходимо присвоить уникальное имя, и указать это имя в скрипте проекта блока управления с учетом индекса, так как по каналу передаются векторы параметров;
- указать в свойствах проекта блока управления адрес UDP-сервера 192.168.56.102. По этому адресу UDP-клиент будет посылать свои дейтаграммы.

В результате сделанных изменений получаются работоспособные проекты, которые могут быть запущены как на разных сетевых станциях, так и на одном компьютере в разных виртуальных машинах, со своими IP-адресами.

Таким образом, подход декомпозиции проектов в среде SimInTech позволяет проводить имитационное моделирование распределенной системы на разных рабочих станциях, при использовании UDP-канала. Такой способ отличается простотой, обусловленной тем, что

протокол UDP не требует согласующих сообщений для установки информационного взаимодействия.

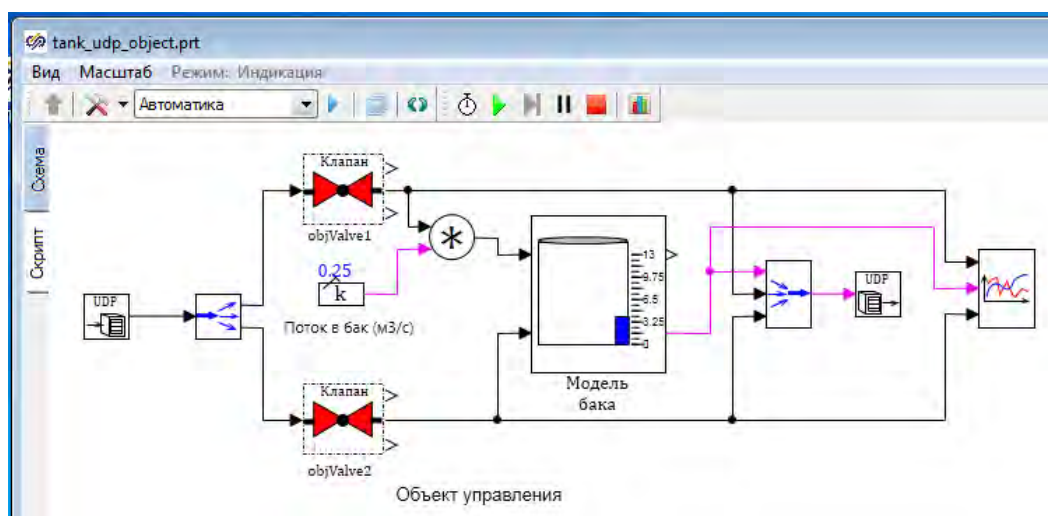


Рис. 5. Измененная схема проекта объекта управления

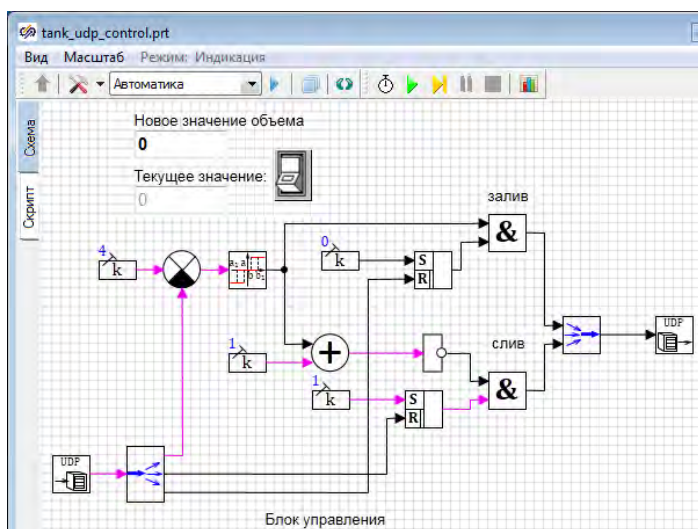


Рис. 6. Схема проекта блока управления

### 3. Организация проектирования распределенной системы через TCP-протокол

Рассмотрим теперь особенности обмена данных по каналу TCP. Для этого изменим исходный проект таким образом, чтобы связь между блоком управления и объектом управления выполнялась по двустороннему каналу обмена данными (рис. 7).

При использовании в настройках TCP локального петлевого IP-адреса (по умолчанию, как правило – 127.0.0.1), проект сохраняет

работоспособность. Однако если проводить декомпозицию проектов аналогично схеме на рисунке 3, при моделировании распределенной системы на разных виртуальных машинах возникают проблемы и ошибки.

Если первым запущен проект с объектом управления, то возникает ошибка соединения с сервером. Если первым запущен проект с блоком управления, то модель запускается в работу, но будет явно наблюдаться рассогласование текущих времен расчета в каждом из проектов (рис. 8). Эти ошибки обусловлены особенностью работы TCP-канала.

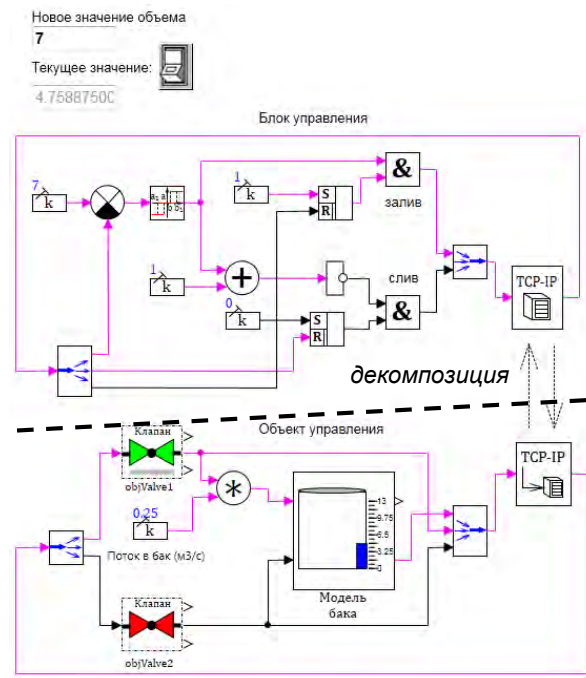


Рис. 7. Распределенная модель управления цистерной с двунаправленным каналом TCP-IP

Расчёт	Время: 47.229	Объектов 28
Расчёт	Время: 49.412	Объектов 51
		Выделен

Рис. 8. Ошибка при первоначальном запуске проекта объекта управления

Для устранения недостатков необходимо создать комплексную модель, которая обеспечит совместный синхронный расчет составляющих ее проектов. В SimInTech для этой цели предусмотрены специальные файлы пакетов проектов (\*.pak). Формирование пакета проектов показано на рис. 9, а параметры расчета пакета – на рис. 10. Параметры расчета во всех проектах,

входящих в пакет, также должны быть согласованы.

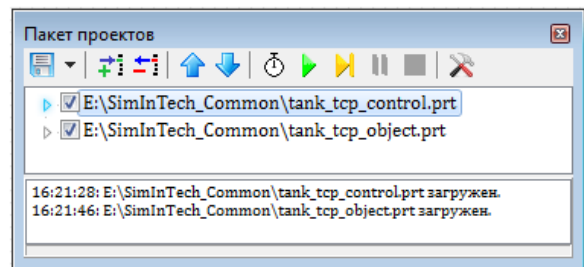


Рис. 9. Формирование файла пакета проектов

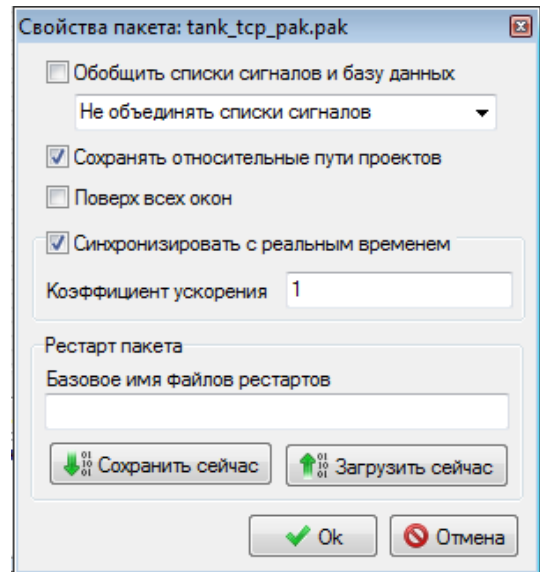


Рис. 10. Параметры расчета пакета проектов

Создав пакет проектов, появляется возможность одновременной загрузки и запуска на выполнение всех необходимых проектов (рис. 11). Синхронизация передачи данных по TCP-каналу при этом обеспечивается автоматически средствами SimInTech.

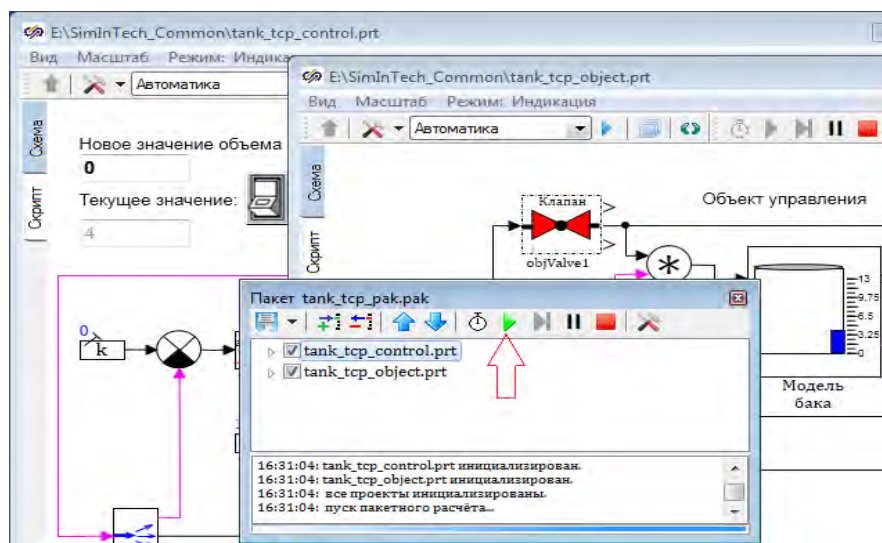


Рис. 11. Запуск в работу пакета проектов

После этого появляется возможность проведения всестороннего тестирования модели: выяснения влияния на ее работу таких параметров расчета, как «Минимальный и Максимальный шаг», «Относительная и Абсолютная ошибка», а что касается канала передачи данных, то тут особо интересно влияние свойства «Шаг обмена данными». Именно это свойство в реальной жизни будет определять требование к пропускной способности канала связи. Закончив предварительные исследования модели, можно осуществить полноценное сетевое тестирование распределенной модели, используя либо виртуальные машины, либо реальные сетевые компьютеры и устройства.

### Заключение

В статье изложена технология проектирования распределенных систем управления на основе встроенных средств среды SimInTech. На примере

простой модели управления уровнем жидкости показаны способы реализации удаленного управления через протоколы TCP и UDP. Однако возможности SimInTech этим не ограничиваются, стандартные средства проектирования среды поддерживают также моделирование информационного взаимодействия по протоколам CAN, Modbus и др. Декомпозиция системы на уровне разных компьютеров позволяет создавать сложные многоуровневые системы управления с использованием, например, экспертных систем или нейронных сетей.

Таким образом, можно заключить, что среда моделирования SimInTech является перспективным средством проектирования современных распределенных систем управления с учетом влияния характеристик информационного взаимодействия между контроллером и объектом или совокупностью объектов управления.

### Литература

1. SimInTech. Среда динамического моделирования. [Электронный ресурс]: <http://simintech.ru>. Дата обращения: 01.09.2019.
2. Working with OMNet++ [Электронный ресурс]: <https://omnetpp.org/documentation/> Дата обращения: 02.09.2019.
3. Хабаров С.П., Шилкина М.Л. Основы моделирования технических систем. Среда SimInTech: Учебное пособие. СПб: Издательство "Лань", 2019. 120 с.
4. Хабаров С.П., Шилкина М.Л. Технология построения распределенной модели системы управления поливом на лесном питомнике в среде SimInTech. Материалы IV научно-технической конференции «Леса России: политика, промышленность, наука, образование». СПб: СПбГЛТУ, 2019, с. 184-187.
5. Хабаров С.П. Использование SimInTech для анализа систем автоматического управления. Сб. научных трудов «Информационные системы и технологии: теория и практика». Вып 11, СПб: СПбГЛТУ, 2019, с.113-125.
6. Слипченко А. С., Амбросовский В.М. Анализ структур современных корабельных систем управления техническими средствами. Навигация и управление движением: материалы докладов VIII Конференции молодых ученых. Издательство ЦНИИ «Электроприбор», 2006. С. 130-136.

### References

1. SimInTech. Sreda dinamicheskogo modelirovaniya [Elektronnyi resurs]: <http://simintech.ru/> Data obrashcheniya: 01.09.2019
2. Working with OMNet++. [Elektronnyi resurs]: <https://omnetpp.org/documentation/> Data obrashcheniya: 02.09.2019
3. Khabarov S. P., Shilkina M. L. Osnovy modelirovaniya tekhnicheskikh system. Sreda SimInTech: Uchebnoe posobie. SPb: Izdatel'stvo Lan', 2019. 120 s.
4. Khabarov S. P., Shilkina M. L. Tekhnologiya postroeniya raspredelennoi modeli sistemy upravleniya polivom na lesnom pitomnike v srede SimInTech. Materialy IV nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie". SPb: SPbGLTU, 2019, s. 184-187
5. Khabarov S. P. Ispol'zovanie SimInTech dlya analiza sistem avtomaticheskogo upravleniya. Sb. nauchnykh trudov "Informatsionnye sistemy I tekhnologii: teoriya I praktika". Vyp. 11. SPb: SPbGLTU, 2019, s. 113-125
6. Slipchenko A. S., Ambrosovsii V. M. Analiz struktur sovremennykh korabel'nykh sistem upravleniya tekhnicheskimi sredstvami. Navigatsiya I upravlenie dvizheniem: materialy dokladov VIII Konferentsii molodykh uchenykh. Izdatel'stvo TSNII "Elektropribor", 2006, S. 130-136.

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

УДК: 621.396.67

### **РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ДВУХЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ ГРЕГОРИ В РАМКАХ МЕТОДА ПОВЕРХНОСТНЫХ ТОКОВ**

**Елена Вячеславовна Волхонская**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры судовых радиотехнических систем  
Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»  
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6  
e-mail: volkhonskaya\_e@mail.ru

**Евгений Владимирович Коротей**

доцент кафедры судовых радиотехнических систем  
Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»  
236029, Калининград, ул. Молодежная, 6  
e-mail: eugeny\_korotey@mail.ru

#### **Аннотация**

В данной работе приведены результаты математического моделирования поля излучения двухзеркальной антенны Грегори в рамках метода поверхностных токов. Авторами на основе стандартного подхода в расчете токов, наводимых волной на проводящей поверхности, а также с использованием результатов анализа геометрических параметров двухзеркальной антенны получены аналитические выражения, позволяющие определить ее поле излучения. Задача решена в два этапа – отыскание поля излучения контррефлектора и отыскание поля излучения всей антенны. Каждый этап был выполнен в два действия – решение внутренней задачи (отыскание и анализ распределения поверхностных токов) и внешней задачи (отыскание поля излучения апертуры с заданным распределением токов). Анализ распределений токов на поверхностях контррефлектора и рефлектора показал, что основной вклад вносит только одна компонента данных токов и что она распределена только радиально. Верификация полученной модели поля излучения показала ее адекватность и позволила определить набор геометрических параметров, по которым может проводиться оптимизация структуры для получения направленных свойств антенны, соответствующих требованиям, предъявляемым к антенным системам наземного сегмента систем спутниковой связи.

**Ключевые слова:** двухзеркальная антенна Грегори, метод поверхностных токов, коэффициент направленного действия, коэффициент использования поверхности.

### **MATHEMATICAL MODEL OF THE GREGORY TWO-MIRROR ANTENNA RADIATION FIELD DEVELOPMENT WITHIN THE SURFACE CURRENT METHOD**

**Elena Volkhonskaya**

the associate professor, Dr.Sci.Tech.,  
the professor of department of ship radio engineering systems  
Baltic state academy of the fishery fleet  
Molodezhnaya, 6, Kaliningrad 236029, Russian Federation  
e-mail: volkhonskaya\_e@mail.ru

**Evgeniy Korotey**

the associate professor of department of ship radio engineering systems  
Baltic state academy of the fishery fleet  
Molodezhnaya, 6, Kaliningrad 236029, Russian Federation  
e-mail: eugeny\_korotey@mail.ru

#### **Abstract**

The results of mathematical modeling of the Gregory two-mirror antenna radiation field within surface current method are represented in this work. Authors on the basis of standard approach in calculation of currents on the conductive surface, induced by the wave, on the one side and within results of analysis of two-mirror antenna geometrical parameters on the other side have received analytical expressions, which allows determine antenna radiation field. The problem was solved in two stages – calculation of secondary reflector and reflector radiation fields. Each stage consists of two actions – solving of internal problem (surface current distribution calculation and it's analysis) and solving of external problem (calculation of the radiation field for aperture with determined surface current distribution). The analysis of reflector and second reflector surface current distributions showed that the main contribution in radiation field is made by one component of surface current and found it's dependence only on radial coordinate. Radiation field model verification has shown it's adequacy and allowed to determine a set of

geometrical parameters for structure optimization with the aim of direct properties achievement, which compliant to antenna of satellite communication system earth segment requirements.

**Key words:** Gregory two-mirror antenna, surface current method, directivity, aperture efficiency.

### Введение

Антенны зеркального типа входят в состав антенных систем наземного сегмента различных систем спутниковой связи и навигации, осуществляющих мониторинг водных биологических ресурсов, наблюдение и контроль за деятельностью промысловых судов и пр. Развитие таких систем связи предполагает освоение новых частотных диапазонов и увеличение пропускной способности каналов связи при снижении излучаемой терминалами мощности [1].

В связи с этим к антеннам таких систем предъявляют специальные требования: возможность работы в нескольких частотных диапазонах, узкая диаграмма направленности (ДН), высокий коэффициент усиления (КУ), малый уровень боковых лепестков [2].

Данные требования (1) включают ограничения на максимальную ширину ДН  $\Delta\theta_{0,707}$  по уровню 0,707, максимальный уровень боковых лепестков (УБЛ)  $\xi_{max}$ , минимальный уровень КУ  $D$  [3]:

$$\begin{cases} \Delta\theta_{0,707} \leq 68 \cdot \lambda / D_0, \\ \xi_{max} \geq -14 \text{ дБ}, \\ D \geq 20 \cdot \lg(D_0/\lambda) + 7, \text{ дБи}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\lambda$  – рабочая длина волны, а  $D_0$  – диаметр основного зеркала.

В зависимости от диапазона рабочих частот применяют зеркала различных диаметров [2]: до 32 м в диапазоне 4-6 ГГц, до 19 м в диапазоне 11-14 ГГц и 11,5 м в диапазоне 20-30 ГГц. Так в С диапазоне (4-8 ГГц) при использовании зеркала с диаметром 32 м ширина ДН будет меняться от 0,08° до 0,16°, при переходе к Х диапазону (8-12 ГГц) и уменьшению диаметра зеркала до 19 м ширина ДН составит от 0,08° до 0,13°, а при работе в Ки диапазоне (12-18 ГГц) и уменьшении диаметра зеркала на верхних частотах до 11,5 м ширина ДН составит от 0,06° до 0,15°. Таким образом, при увеличении рабочей частоты требуемая ширина ДН настолько мала, что при анализе направленных свойств зеркальной антенны на стадии ее проектирования актуальным представляется решение задачи получения как можно более точных оценок ее полевых характеристик.

К основным методам расчета характеристик зеркальных антенн относятся метод геометрической оптики, апертурный метод и метод поверхностных токов (далее токовый метод), а также более строгий и точный метод интегральных уравнений [1]. В основе наиболее распространенных апертурного и токового методов лежат следующие ограничения [1]: 1) ДН облучателя в свободном пространстве и в составе зеркальной антенны одинаковы; 2) любая точка поверхности контррефлектора или рефлектора находится в дальней зоне по отношению к источнику излучения; 3) размеры рефлектора и контррефлектора значительно превышают длину

волны; 4) отсутствует обратное влияние рефлектора на ДН контррефлектора.

В работах [4,5] авторами было показано, что использование апертурного метода в сравнении с токовым методом приводит к завышенным оценкам максимального УБЛ, коэффициента направленного действия (КНД) и коэффициента использования поверхности (КИП), а также к заниженным оценкам ширины ДН. Поэтому в качестве рабочего метода построения поля излучения двухзеркальной антенны был выбран токовый метод.

### 1. Постановка задачи

Ключевыми вопросами при построении математической модели поля излучения двухзеркальной антенны Грегори являются расчет амплитудно-фазовых распределений токов на поверхностях контррефлектора и рефлектора, а также суммарных полей, создаваемых данными токами в дальней зоне.

Решение задачи оценки амплитудно-фазовых распределений поверхностных токов осуществлялось на основе стандартного выражения (2) вида [6]:

$$\vec{j} = 2[\vec{n} \times \vec{H}], \quad (2)$$

где  $\vec{j}$  – вектор плотности поверхностных токов,  $\vec{n}$  – вектор нормали к поверхности контррефлектора или рефлектора в рассматриваемой точке,  $\vec{H}$  – вектор напряженности магнитного поля, создаваемого источником излучения в данной точке.

Для определения углов ориентации векторов нормали и напряженности магнитного поля были использованы две сферические системы координат с началами в фокусах контррефлектора и рефлектора, а также полярные системы координат, связанные с плоскостями их раскрытия.

Решение задачи определения поля излучения контррефлектора и рефлектора осуществлялось путем численного интегрирования вектора плотности поверхностных токов в соответствии с выражениями (3) вида [6]:

$$\begin{cases} \vec{E}_0 = A[N_x \cos \theta \cos \varphi + N_y \cos \theta \sin \varphi - N_z \sin \theta] \\ \vec{E}_\varphi = A[N_x \sin \varphi - N_y \cos \varphi] \end{cases}, \quad (3)$$

где  $N_x, N_y, N_z$  – компоненты вектора излучения,

$A = -30i\beta_0 e^{-i\beta_0 r} / r$ ,  $\beta_0 = 2\pi/\lambda$  – волновое число, а  $r$  – расстояние до точки наблюдения, а для определения компонент вектора излучения использовалось следующее соотношение (4):

$$\vec{N} = \int_S \vec{j} \cdot e^{-i\beta_0 \Delta r} dS, \quad (4)$$

где  $\Delta r$  – разность хода лучей из рассматриваемой точки на поверхности контррефлектора или рефлектора и его фокуса до точки наблюдения в дальней зоне, а  $dS$  – элемент площади данной поверхности.

**2. Математическая модель поля излучения**

Ориентация вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H} = \dot{H}_m \vec{i}_\varphi$  (рис. 1, а) была задана сферическими углами  $(\alpha_2, \beta_2)$ , а компоненты вектора нормали  $\vec{n}$  (рис. 1, б) – определены через сферические углы  $(\eta_2, \xi_2)$  в соответствии с выражениями (5) и (6):

$$i_{\varphi x} = 0, i_{\varphi y} = \cos \beta_2, i_{\varphi z} = \sin \beta_2, \quad (5)$$

$$n_x = -\sin \eta_2 \cos \xi_2, i_{\varphi y} = -\sin \eta_2 \sin \xi_2, \quad (6)$$

$$i_{\varphi z} = -\cos \eta_2.$$

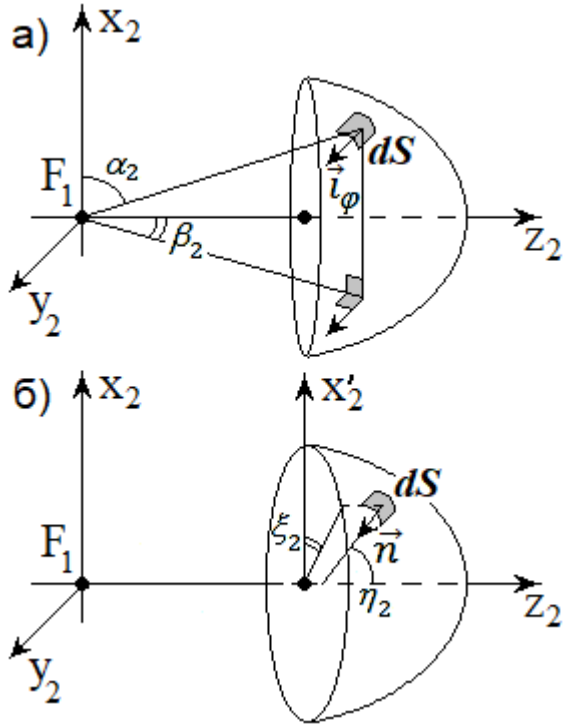


Рис. 1. Задание ориентации в пространстве вектора напряженности магнитного поля (а) и нормали к элементу поверхности контррефлектора (б)

Для построения распределений компонент вектора плотности наведенных на поверхности контррефлектора токов были получены тригонометрические соотношения (7) – (9), связывающие введенные углы и направление на элемент поверхности  $\psi_2$  (рис. 2, а) с полярными координатами в плоскости раскрыва контррефлектора  $(R_2, \xi_2)$ :

$$\cos \alpha_2 = \cos \xi_2 \sin \psi_2, \cos \psi_2 = \cos \beta_2 \sin \alpha_2, \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \eta_2 = \frac{\sin \psi_2}{\varepsilon_2 - \cos \psi_2}, \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} \frac{\psi_2}{2} = \frac{p_2}{R_2(1 + \varepsilon_2)} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{R_2^2}{p_2^2} (1 - \varepsilon_2^2)} \right), \quad (9)$$

где  $\varepsilon_2$  и  $p_2 = 2f_2$  – эксцентриситет и параметр сечения контррефлектора плоскостью, содержащей ось его симметрии (эллипса), а  $f_2$  – фокусное расстояние. Знак «+» в данном выражении соответствует глубоким (короткофокусным) вспомогательным зеркалам, а знак «-» – мелким (длиннофокусным). Для задания расстояния  $\rho_2$  от фокуса F1 (рис. 2, а) до точки на поверхности контррефлектора использовалось выражение (10) вида:

$$r = \rho_2 = \frac{R_2}{\sin \psi_2}. \quad (10)$$

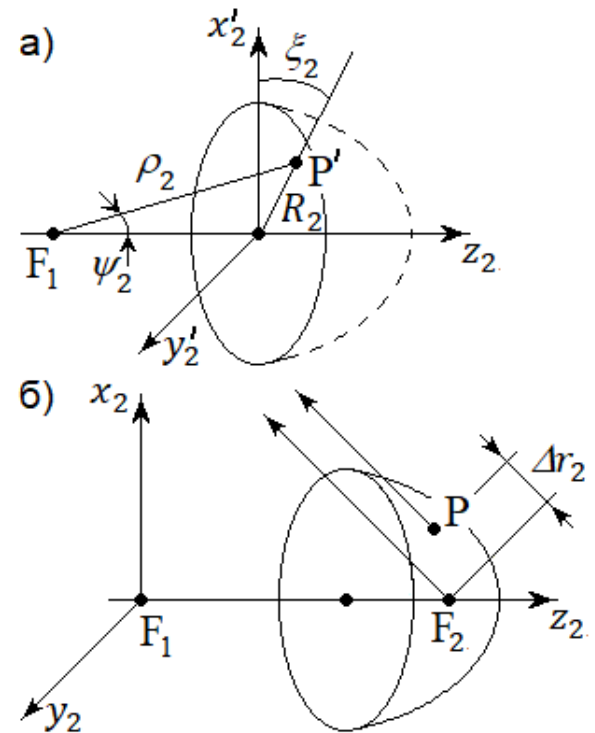


Рис. 2. Полярная система координат (а) и определение разности хода лучей (б)

На основе выражения (2) были определены и построены распределения компонент токов (рис. 3), наведенных на поверхности контррефлектора при использовании в качестве облучателя микрополосковой логопериодической антенны Ку диапазона [7].

Анализ данных распределений показал, что компоненты  $i_{y2}$  и  $i_{z2}$  отличны от нуля только для удаленных от центра раскрыва участков контррефлектора, но при этом значения компонент для диаметрально противоположных углов  $\xi_2$  имеют противоположный знак и создаваемые ими поля гасят друг друга. Таким образом, основной вклад в поле излучения контррефлектора в дальней зоне вносит компонента  $i_{x2}$ , причем для нее отсутствует зависимость от угла  $\xi_2$ .



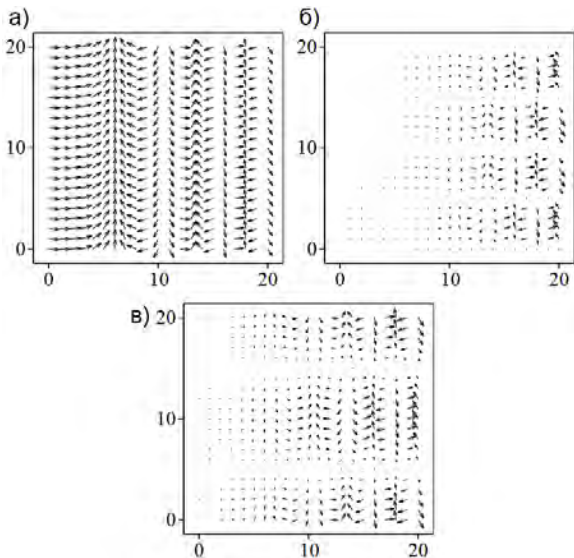


Рис. 3. Зависимость компонент плотности поверхностных токов  $j_{x2}$  (а),  $j_{y2}$  (б) и  $j_{z2}$  (в) для рабочей частоты 11,806 ГГц от номеров отсчетов полярных координат: радиальной координаты  $R_2$  – по оси абсцисс, и угла  $\xi_2$  – по оси ординат

Для проведения расчетов ненулевой компоненты вектора излучения  $N_{x2}$  в соответствии с (4) было получено выражение, определяющие элемент поверхности контррефлектора  $dS_2$  (11):

$$dS_2 = dl_1 dl_2 = \frac{\rho_2 d\psi_2}{\cos \delta_2} \cdot R_2 d\xi_2, \quad (11)$$

где угол  $\delta_2 = \eta_2 - \psi_2$  между дугами  $dl_1$  и  $dl_2$  (рис. 4) был определен в виде (12)

$$\operatorname{tg} \delta_2 = \frac{\varepsilon_2 \sin \psi_2 - \sin 2\psi_2}{\cos 2\psi_2 - \varepsilon_2 \cos \psi_2}. \quad (12)$$

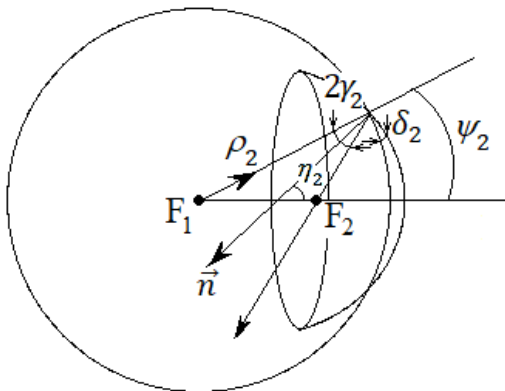


Рис. 4. Определение элемента поверхности эллипсоида

Для перехода от  $d\psi_2$  к  $dR_2$  было использовано выражение (10), определяющее связь  $\rho_2$  и  $R_2$ , а также учтена форма сечения контррефлектора (13), определяемая его геометрией

$$\rho_2 = \frac{R_2}{1 + \varepsilon_2 \cos \psi_2}. \quad (13)$$

В результате связь данных дифференциалов приняла вид (14):

$$dR_2 = \frac{\rho_2 (\cos \psi_2 - \varepsilon_2)}{[1 - \varepsilon_2 \cos \psi_2]^2} d\psi_2. \quad (14)$$

Величина разности хода лучей  $\Delta r_2$  (рис. 2, б), входящая в выражение (4), была определена в виде (15):

$$\Delta r_2 = R_2 \sin \theta_2 \cos[\varphi_2 - \xi_2] + (R_2 \operatorname{ctg} \psi_2 - 2f_2) \cos \theta_2. \quad (15)$$

Отсутствие зависимости  $i_{x2}$  от угла  $\xi_2$  позволило перейти от двумерного интеграла по раскрытию к одномерному интегралу по переменной  $R_2$  с использованием выражения (16), определяющего функцию Бесселя:

$$\int_0^{2\pi} e^{-i\beta_0 R_2 \sin \theta_2 \cos[\varphi_2 - \xi_2]} d\xi_2 = 2\pi \cdot J_0(\beta_0 R_2 \sin \theta_2). \quad (16)$$

По полученной зависимости  $N_{x2}(\theta_2, \varphi_2)$  в соответствии с выражениями (3) были построены ДН контррефлектора в двух главных плоскостях  $\varphi_2 = 0$  (Е) и  $\varphi_2 = \pi/2$  (Н) (рис. 5).

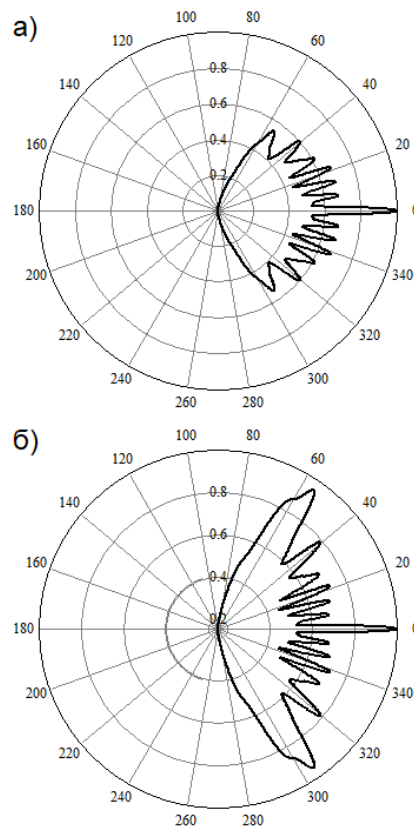


Рис. 5. Нормированные ДН контррефлектора в дальней зоне: а) Е-плоскость; б) Н-плоскость

Методика расчета распределения компонент плотности поверхностных токов  $\{j_{x1}, j_{y1}, j_{z1}\}$ , наведенных на рефлекторе, а также поля самого рефлектора в дальней зоне  $\{E_{\theta 1}, E_{\varphi 1}\}$  подробно описана авторами в работе [8].

### 3. Анализ полученных результатов

Анализ ДН контррефлектора показал, что пространственная амплитудная характеристика направленности не является осесимметричной, а, значит, при нахождении поля излучения двухзеркальной антенны необходимо использовать обе компоненты электрического поля.

Применение методики, изложенной в [8], позволило получить картину распределения токов, наведенных на поверхности рефлектора и его ДН. Распределение компоненты  $j_{x1}$ , обеспечивающей основной вклад в поле излучения антенны, а также ДН рефлектора приведены на рис. 6.

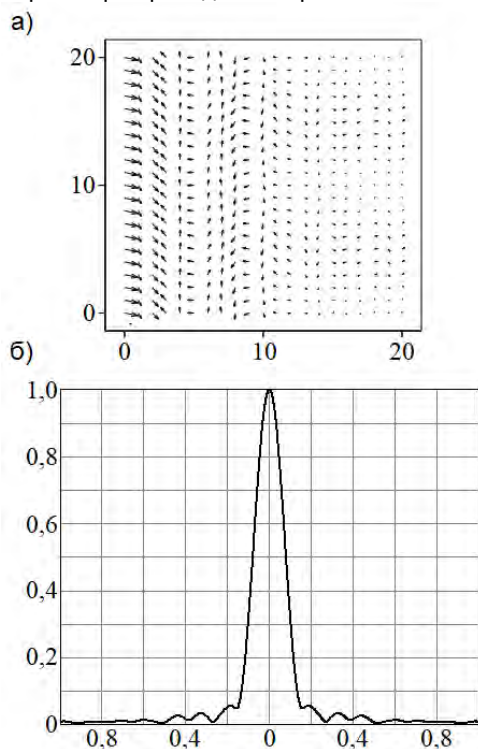


Рис. 6. Зависимость компоненты плотности поверхностных токов  $j_{x1}$  от полярных координат для рабочей частоты 11,806 ГГц (а) и нормированная ДН рефлектора (б)

Анализ распределения компоненты плотности поверхностных токов  $j_{x1}$  показал, что, отсутствует зависимость компоненты от угла  $\xi_1$ , а с ростом радиальной координаты  $R_1$  амплитуда данной компоненты заметно убывает к краям зеркала, что свидетельствует о существенном отличии КИП зеркала от 1.

По полученной ДН двухзеркальной антенны были рассчитаны основные параметры антенной системы, такие как ширина ДН по уровню 0,707, максимальный УБЛ, КНД и КИП. Для указанного значения рабочей частоты они оказались равными 0,115°, -25,178 дБ, 64,523 дБ и 0,724, соответственно.

Из теории двухзеркальных антенн известно, что антенны систем Грегори и Кассегрена могут иметь одинаковые характеристики направленности, но при этом отличаться размерами контррефлектора (его диаметр больше для системы Кассегрена), а также протяженностью антенны в направлении фокальной оси (протяженность больше для систем Грегори). Приведенные результаты для антенны системы Грегори в сравнении с полученными ранее [8] для антенны системы Кассегрена подтверждают данное правило: при диаметре раскрытия контррефлектора 900 мм указанные выше параметры принимают значения 0,123°, -26,779 дБ, 63,843 дБ и 0,619, соответственно.

Таким образом, предложенную математическую модель поля излучения двухзеркальной антенны системы Грегори можно считать адекватной и использовать для проведения модельных исследований зависимости направленных свойств такой системы от ее геометрических размеров, а также в пределах рабочего диапазона частот.

Анализ построенной математической модели позволяет сформировать набор геометрических параметров, по которым может проводиться процедура оптимизации конструкции двухзеркальной антенны: радиус раскрытия, глубина и фокусное расстояние контррефлектора, радиус раскрытия и фокусное расстояние рефлектора.

### Заключение

Таким образом, в результате проведенных теоретического и модельного исследований построена математическая модель поля излучения двухзеркальной антенны системы Грегори, позволяющая проводить оптимизацию конструкции двухзеркальной антенны на стадии проектирования для обеспечения направленных свойств антенны, соответствующих требованиям, предъявляемым к антенным системам наземного сегмента систем спутниковой связи.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием на выполнение НИОКР «Разработка электродинамических моделей облучателей больших зеркальных антенн в составе системы ГМССБ для исследования качества решения задач спутниковой радиосвязи и радионавигации», приказ № 69 от 04.03.2019 г., п.п. 1.19.

### Литература

1. Сомов А.М., Кабетов Р.В. Многолучевые зеркальные антенны: геометрия и методы анализа. М.: Горячая линия-Телеком, 2019. 256 с.
2. Бей Н.А., Вечтомов В.А., Зимин В.Н. Антенны систем спутниковой связи и навигации: учебное пособие / [под ред. Н. А. Бея]. М.: Рудомино, 2010. 220 с.
3. Фролов О. П. Антенны для земных станций спутниковой связи. М.: Радио и связь, 2000. 376 с.
4. Волхонская Е.В., Коротей Е.В., Кужекин Д.В. Сравнительный анализ оценки поля излучения параболической зеркальной антенны апертурным методом и методом поверхностных токов // IV Балтийский морской форум [Электронный ресурс]: материалы Международного морского форума. Калининград: Изд-во БГАРФ, 2016. С. 401-407. № гос. рег. 0321603515.

5. Карлов А.М., Волхонская Е.В., Коротей Е.В. Сравнительный анализ апертурного и токового методов при оценке поля излучения двухзеркальной антенны Кассегрена // Радиосистемы «Территориально-распределенные системы охраны». М.: Радиотехника, № 2. 2019. С. 6-11.
6. Драбкин А.Л., Зузенко В.Л. Антенно-фидерные устройства. М.: Советское радио, 1961. 816 с.
7. Волхонская Е.В., Коротей Е. В., Кузечкин Д.В. Микрополосковая логопериодическая антенна // Патент на изобретение № 2571607 от 24.11.2015.
8. Волхонская Е.В., Коротей Е. В. Модельная оценка поля излучения двухзеркальной антенны Кассегрена в рамках апертурного и токового методов // VI Международный Балтийский морской форум [Электронный ресурс]: материалы Международного морского форума. Калининград: Изд-во БГАРФ, 2018. С. 423-433.

#### References

1. Somov A.M., Kabetov R.V. *Mnogoluchevye zerkal'nye anteny: geometriya i metody analiza*. M.: Goryachaya liniya-Telekom, 2019. 256 p.
2. Bej N.A., Vechtomov V.A., Zimin V.N. *Anteny sistem sputnikovoj svyazi i navigacii: uchebnoe posobie* / [pod red. N. A. Beya]. M.: Rudomino, 2010. 220 p.
3. Frolov O. P. *Anteny dlya zemnyh stancij sputnikovoj svyazi*. Moscow, Radio i svyaz', 2000. 376 p.
4. Volhonskaya E.V., Korotej E.V., Kuzhekin D.V. (2019). *Sravnitel'nyj analiz ocenki polya izlucheniya parabolicheskoy zerkal'noj anteny aperturnym metodom i metodom poverhnostnyh tokov*. IV Baltijskij morskoy forum [Elektronnyj resurs]: materialy Mezhdunarodnogo morskogo foruma, 401-407. № gos. reg. 0321603515.
5. Karlov A.M., Volhonskaya E.V., Korotej E.V. (2019). *Sravnitel'nyj analiz aperturnogo i tokovogo metodov pri ocenke polya izlucheniya dvuhzeral'noj anteny Kassegrena*. Radiosistemy «Territorial'no-raspredelelynye sistemy ohrany», 2, 6-11.
6. Drabkin A. L., Zuzenko V. L. *Antenno-fidernye ustrojstva*. Moscow, Sovetskoe radio, 1961. 816 p.
7. Volhonskaya, E. V., Korotej, E. V., & Kuzhekin, D. V. *Mikropoloskovaya logoperiodicheskaya antenna*. Patent na izobretenie № 2571607 ot 24.11.2015.
8. Volhonskaya E.V., Korotej E.V. (2018). *Model'naya ocenka polya izlucheniya dvuhzeral'noj anteny Kassegrena v ramkah aperturnogo i tokovogo metodov*. VI Mezhdunarodnyj Baltijskij morskoy forum [Elektronnyj resurs]: materialy Mezhdunarodnogo morskogo foruma, 423-433.

УДК 629.5.024:532.54

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СУДОХОДНОГО ШЛЮЗА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСКОРЕННОГО И БЕЗОПАСНОГО СУДОПРОПУСКА

**Игорь Викторович Липатов**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры водных путей и гидротехнических сооружений  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова 5  
e-mail: i\_lipatov@mail.ru

**Александр Николаевич Ситнов**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водных путей и  
гидротехнических сооружений Волжский государственный университет водного транспорта  
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова 5  
e-mail: waterway@vgavt-nn.ru

**Валерий Иванович Решняк**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химии и экологии  
Государственный университет морского и речного флота имени адм. С.О. Макарова  
198035, Санкт Петербург, ул. Двинская 5/7  
e-mail: reshnyakVI@gumrf.ru

**Анатолий Сидорович Слюсарев**

доктор технических наук, профессор кафедры прикладной механики и  
подъемно-транспортных механизмов  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова 5  
e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

### Аннотация

В статье представлены результаты численного моделирования наполнения камер шлюза Волго-Донского судоходного канала. Особенности работы исследованы с помощью нового подхода изучения распределения поля и мощности энергии потока в контрольных сечениях. влияния на нее элементов гашения энергии потока воды на судоходных гидротехнических сооружениях. В качестве объекта исследования авторами принята камера гашения энергии потока судоходного шлюза с головной системой питания.

Методом решения задачи является численное моделирование гидродинамики потока, проходящего через камеру гашения. Это позволило проанализировать изменение мощности потока в характерных сечениях камеры гашения и выявить области максимальной концентрации энергии импульса сил.

Для решения задачи использовались векторные уравнения определения баланса внутреннего импульса потока. В качестве учитываемых факторов при составлении баланса энергии приняты: конвергенция потока внутри камеры гашения; внешние источники массы среды; внешние усилия по контуру исследуемой области; гравитация и совокупность внутренних сил (кавитация, аэрация и т.д.). Основными индикаторами приняты изменение импульса энергии потока в контрольных областях и мощность энергии в контрольных сечениях.

Предварительные оценочные расчеты показывают, что принятые решения с использованием данного подхода позволяют увеличить энергопоглощение камеры гашения на 15 %.

**Ключевые слова:** Судоходный шлюз, камера гашения, конструкция гасителей, закон сохранения импульса, потеря энергии, шлюзование судна.

## IMPROVING OF THE STUDY METHODOLOGY OF HYDRODYNAMIC PROCESSES IN THE SHIPPING LOCK CHAMBER TO ENSURE ACCELERATED AND SAFE NAVIGATION

**Igor V. Lipatov**

the associate professor, Dr.Sci.Tech  
professor of the Department of waterways and hydraulic engineering  
Volga state University of water transport  
603950, Nizhny Novgorod, Nesterov street 5  
e-mail: waterway@vgavt-nn.ru

**Alexander N. Sitnov**

the professor, Dr.Sci.Tech  
head of the Department of waterways and hydraulic engineering  
Volga state University of water transport  
603950, Nizhny Novgorod, Nesterov street 5

e-mail: waterway@vgavt-nn.ru

**Valeriy I. Reshnyak**

the professor, Dr.Sci.Tech

head of the Department of chemistry and ecology

St. Petersburg University of water communications

198035, St. Petersburg, Dvinskaya str. 5/7

e-mail: reshnyakVI@gumrf.ru

**Anatoliy S. Slyusarev**

the professor, Dr.Sci.Tech

Professor of applied mechanics and lifting and transport mechanisms

Volga state University of water transport

603950, Nizhny Novgorod, Nesterov str. 5

e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

### Abstract

The article presents the results of numerical simulation of lock chambers filling of the Volga-Don Shipping Canal. Features of the work are investigated using a new study approach to the distribution of the field and power flow in the control sections, the influence on it the energy damping elements of water flow at navigable hydraulic structures. As an object of the study the authors have taken a stilling basin of a shipping lock with a head power system.

A method for solving the problem is the numerical simulation of the hydrodynamics of flow passing through a stilling basin. It made possible to analyze the change in the flow power in the characteristic sections of the stilling basin and to reveal the regions of the energy maximum concentration of the impulse forces.

To solve the problem, vector equations were used to determine the balance of the internal momentum of the flow. When compiling the energy balance the following factors were considered: convergence of the flow inside the stilling basin; external sources of mass; external efforts along the contour of the studied area; gravity and the aggregate of internal forces (cavitation, aeration, etc.). The main indicators are the change in the momentum of the energy flow in the control areas and the energy power in the control sections.

Preliminary estimated calculations show that decisions made using this approach can increase the energy absorption of the stilling basin by 15%.

**Keywords:** shipping lock, stilling basin, flow energy dissipator construction, law of conservation of momentum, energy loss, ship lockage

### Введение

Судоходные шлюзы являются неотъемлемой частью инфраструктуры внутренних водных путей России. Стабильность и устойчивость работы этих сооружений напрямую определяет качество работы водного транспорта, поскольку на сегодняшний день они являются основным фактором, сдерживающим ритмичность движения флота в районе гидротехнических сооружений. Подавляющее большинство шлюзов в нашей стране имеет головную систему питания, для которой прямое ускорение процесса наполнения камеры шлюза за счет увеличения скорости поднятия затвора ведет к ухудшению условий отстоя судна в процессе шлюзования и, как следствие, к возможным аварийным ситуациям.

С одной стороны, при увеличении подачи расхода воды сокращается время наполнения камеры шлюза. С другой стороны, это способствует интенсификации волновых процессов в камере и, как результат, росту усилий в швартовых канатах шлюзуемых судов. В случае превышения критической величины разрывного усилия в швартовом канате судно наваливается на ворота шлюза и шлюз выходит из эксплуатации. Несмотря на это, в работах ряда авторов [1,2,3] показано, что совершенствование работы головных систем наполнения камеры шлюза является наиболее перспективным направлением улучшения работы шлюза.

В процессе наполнения камеры шлюза рабочие ворота поднимаются над порогом (дном верхнего канала) и поток устремляется в камеру гашения энергии. (см. рис.1)

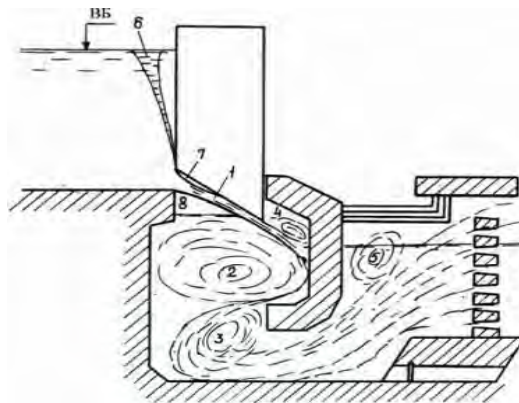


Рис. 1 – Истечение потока из-под рабочих ворот шлюза в камеру гашения при наполнении камеры.

Транзитная струя 1 вытекает из-под щита под действием силы тяжести. При этом потенциальная и кинетическая энергии воды трансформируется при прохождении в камеру гашения. Затем она устремляется в основную часть камеры шлюза, в виде гидродинамической силы непосредственно

воздействуя на шлюзующееся судно. Для улучшения условий отстоя судна, часть энергии потока стараются погасить в границах камеры гашения. На входе в камеру часть энергии диссипирует в турбулентных вихрях 2, 3, 4, 5 и 6. Помимо этого образующиеся вихри в области 7 и 8 также отбирают на себя часть энергии движущегося потока.

Однако основная потеря энергии потоком происходит при его взаимодействии с гасящими элементами камеры шлюза посредством обмена импульсом энергии при ударе потока о препятствие. Первые потери энергии поток испытывает при ударе о гасительный экран, затем при ударе о стенку падения верхней головы, потом о дно камеры гашения (дно гасящего колодца) и в завершении часть энергии поглощается при ударе о балки гашения на выходе из камеры гашения.

Традиционным подходом к исследованию вышеозначенных сложных гидродинамических процессов являлось использование лабораторных и натурных измерений. При этом в лабораторных исследованиях негативное влияние играл масштабный фактор, а при натурных исследованиях ограничено влияние на изменение исходных параметров потока. Здесь как в первом, так и во втором случаях, исследования проводились по принципу «черного ящика», то есть исследователь мог только изменять исходные параметры и получать на это отклик в виде конечных результатов. Но вся картина хода гидродинамических процессов в камере гашения и основной части камеры шлюза, где отстает судно, оставалась неясной. Естественно, это крайне затрудняло полноценное исследование условий отстоя судна в камере шлюза и поиск оптимальных гидравлических решений при эксплуатации сооружений.

### 1. Постановка задачи

Учитывая вышеизложенное, нами использован более совершенный подход к исследованию гидродинамических явлений в виде математического моделирования на базе решения уравнений Навье-Стокса. Так как наибольший практический интерес представляют случаи шлюзования крупнотоннажного флота с максимальным стеснением живого сечения камеры шлюза, то в дальнейшем ограничимся решением двумерной задачи процесса наполнения типовой камеры Волго-Донского канала при шлюзовании судна типа «Волго-Дон».

Учитывая нелинейность и нестационарность гидродинамических процессов в камере шлюза, исследования процессов гашения будем выполнять на фрагментарных моделях в условиях квазистационарного состояния. В практическом плане интерес представляет неподтопленное истечение потока в начальный момент маневрирования рабочих ворот, поэтому в дальнейшем ограничимся рассмотрением открытия ворот на высоту  $a = 0.25 - 1$  м, с шагом 0.25 м. и принятыми по данным натурных наблюдений соответствующие им глубины в камере шлюза  $h = 4, 4.5, 4.75, 6$  м. По аналогии с лабораторным экспериментом, для оценки гидродинамических процессов в камере гашения

можно ограничиться рассмотрением половины длины шлюзовой камеры, а создание соответствующей глубины в камере обеспечить за счет подпора от прямоугольной преграды в конце расчетной области, общий вид которой для судоходного шлюза представлен на рис. 2.



Рис. 2 Расчетная область исследуемого шлюза

В качестве отправной точки для создания математической модели процесса возьмем двумерные уравнения Навье-Стокса в следующем виде :

$$\begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} - \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right) &= F_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}; \\ \frac{dV_y}{dt} - \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} \right) &= F_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dt}$$

где :  $t$  – время;

$V_x, V_y$  – компоненты абсолютной скорости движения жидкости;  
 $\rho$  – плотность;  
 $\nu$  – эффективная вязкость.

Принимая во внимание особенность моделирования процесса обтекания ворот, связанную с математическим моделированием поведения двухфазной среды (вода-воздух), для уравнений используем дискретизацию расчетной области с помощью метода контрольного объема. Суть метода состоит в следующем. Расчетная область разбивается на некоторое число непересекающихся контрольных объемов таким образом, что каждая узловая точка содержится в одном контрольном объеме. Дифференциальные уравнения интегрируются по каждому контрольному объему. Для вычисления интегралов используют кусочные профили, которые описывают изменение исследуемой величины между узловыми точками. В результате находится дискретный аналог дифференциального уравнения, в который входят значения исследуемой величины в нескольких узловых точках.

Одним из важных преимуществ метода контрольного объема является то, что в нём заложено точное интегральное сохранение таких величин как масса, количество движения и энергия для любого объема, группы объемов и всей расчетной области. Это свойство справедливо при любом числе узлов, а не только для предельного случая их очень большого числа. Поэтому даже решение на грубой сетке будет удовлетворять точным интегральным балансам [4,5].

Для отслеживания границы раздела сред «вода-воздух» систему уравнений дополним выражением для пассивного маркера – VOF скаляра. С помощью этой формальной величины

впоследствии предполагается осуществлять объемное отслеживание распределения сред воды и воздуха по исследуемой расчетной области. Для создания гидродинамической модели воспользуемся методом объемного слежения статической сетки. Первоначальная методика объемного слежения – метод VOF была предложена Бельчем и Харлоу [6,7]. Согласно ей отдельные частицы слежения используются в каждой ячейке. Этот постулат аналогичен принципу метода контрольного объема, где любая переменная имеет только одно значение в ячейке. Херт и Николз сформулировали следующее уравнение перемещения для VOF скаляра [6]:

$$\frac{\partial}{\partial t} C + \vec{U} \text{grad} C = 0 \quad (2)$$

где:  $C$  – объемная концентрация тяжелой жидкости VOF скаляра;

$U$  – вектор скорости.

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \vec{U} = 0 \quad (3)$$

может быть записано в следующем виде:

$$\frac{D}{Dt} (\log_e \rho) + \nabla \vec{U} = 0 \quad (4)$$

где:  $\rho$  – плотность;

$D/Dt$  полная производная по плотности.

Принимаем, что плотность жидкости и воздуха постоянна и тогда (2) принимает вид:

$$\nabla \vec{U} = 0 \quad (5)$$

Возвращение в уравнение (2) дает:

$$\frac{\partial}{\partial t} C + \nabla C \vec{U} = 0 \quad (6)$$

где:  $C$  имеет только два значения: 1 - для жидкости и 0 - для воздуха.

Поверхностное натяжение учитывается использованием модели непрерывного поверхностного натяжения (НПН), предложенной Блэкбиллом и др [5,6]. Поверхностное натяжение вызывает изменение давления  $\Delta p$  в области контакта между двумя средами, которые могут быть выражены как:

$$\Delta p = \sigma \cdot k \quad (7)$$

где:  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;

$k$  – средняя поверхностная кривизна.

Согласно модели VOF  $k$  определяется так:

$$k = -\nabla \cdot \left( \frac{\nabla C}{|\nabla C|} \right) \quad (8)$$

Эффект поверхностного натяжения учитывается прибавлением поверхностного натяжения, вызванного перепадом давления в уравнении импульса.

Для окончательного замыкания системы уравнений необходимо определиться с математической моделью для описания турбулентных эффектов в потоке жидкости. В явном виде за их присутствие в системе уравнений отвечает величина  $\nu$ . Согласно современным представлениям о природе турбулентных процессов эффективная вязкость является

алгебраической суммой кинематической и турбулентной вязкости (последнюю еще называют коэффициентом турбулентного обмена). Причем, если первая составляющая является характеристикой жидкости, то по поводу теоретического определения второй составляющей имеется большое количество мнений. Наиболее проверенным является так называемый  $k-\varepsilon$  подход, которым далее и воспользуемся. Согласно этому подходу коэффициент турбулентной вязкости определяется как [8,9]:

$$\nu_T = c_p \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

где:  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;

$\varepsilon$  – коэффициент диссипации турбулентной кинетической энергии.

Данные величины находятся по значениям высокорейнольдсовской модели:

- для кинетической энергии турбулентности  $k$

формулы (10) - (14):

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho \tilde{u}_j k - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \mu_t (P + P_b) - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial \mu_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial \mu_i}{\partial x_i} + \mu_t P_{NL} \quad (10)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (11)$$

$$P \equiv 2S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (12)$$

$$P_b = -\frac{g_i}{\sigma_{n,t}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (13)$$

$$P_{NL} = -\frac{P}{\mu_t} \tilde{u}'_i \tilde{u}'_j \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \left( P - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\rho k}{\mu_t} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \quad (14)$$

В этих выражения принято  $P_{NL} = 0$  для линейных моделей, а  $\sigma_k$  обозначает эмпирический коэффициент среды.

- скорость диссипации кинетической  $\varepsilon$  энергии определяется по формуле:

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t} (\sqrt{g} \rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho \tilde{u}'_j \varepsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left[ \mu_t P - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_b - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_{NL} \quad (15)$$

где:  $\sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_{\varepsilon 3}, C_{\varepsilon 4}$  – эмпирические коэффициенты, значения которых приведены в [9]

Для окончательной практической реализации численной математической модели необходимо

описать расчетную область интегрирования, в которой движение потока определяется соответствующими граничными и начальными условиями. Геометрический контур расчетного пространства *ABCDEFGHIJKL* с характерными граничными областями представлен на рис. 3.

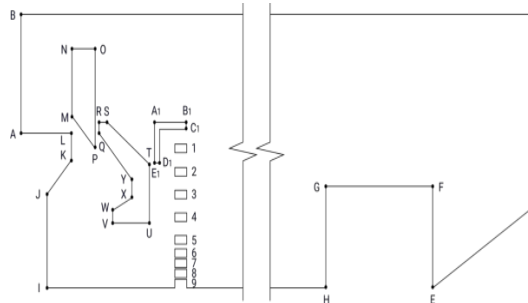


Рис. 3 – Граничные области расчетной модели

Рис. 3 включает в себя следующие граничные области :

- AB* – вход потока (верхний подходной канал);
- ALKJI* – порог и стенка падения;
- RSTUVWXYZQ* - очертание гасительного экрана;
- E1 A1 B1 C1 D1* – уголок балок гашения;
- MNOP* – подъемно опускные ворота верхней головы камеры шлюза;
- BC* – свободная поверхность;
- CD* – нижние ворота;
- DE* – выход потока;
- HGFE* – водослив, порог уровня воды;
- IH* – дно камеры шлюза;
- 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 – балки гашения.

По периметру расчетного пространства действуют следующие краевые (граничные) условия :

$$x, y \in AB - \text{входное сечение} : \begin{aligned} P &= 10000 * x : \kappa = 0.05 : \varepsilon \\ &= 0.017 : VOF \quad (16) \\ &= 1 \end{aligned}$$

$$x, y \in BC - \text{свободная поверхность,} \begin{aligned} V_x &= 0; \quad \frac{dk}{dn} = \frac{d\varepsilon}{dn} = \frac{dVOF}{dn} = 0 \quad (17) \end{aligned}$$

$$x, y \in ED - \text{свободный выход потока,} \begin{aligned} \frac{dV_n}{dn} = \frac{dk}{dn} = \frac{d\varepsilon}{dn} = \frac{dVOF}{dn} = 0 \quad (18) \end{aligned}$$

Для всех остальных граничных областей предполагается граничное условие типа – «стенка» с коэффициентом шероховатости, равным для бетона 0.01 м. Для подъемно-опускных ворот тип так же стенка, но с коэффициентом шероховатости металла 0.001 м [10]. Таким образом, граничные условия в этих областях запишутся следующим образом:

$$V_x = V_y = 0; \quad \frac{dk}{dn} = \frac{d\varepsilon}{dn} = \frac{dVOF}{dn} = 0 \quad (19)$$

Учитывая, что на сегодняшний день отсутствуют хоть какие-то данные по характеру распределения энергии в потоке, проходящего через гасительную камеру, математическая модель была дополнена контрольными сечениями,

в границах которых программа вычисляла погонную энергию, приходящуюся на контрольное сечение [11]. Энергия определялась по формуле :

$$W = \iint_S \left( \frac{mv^2}{2} - \frac{p}{\rho} \right) dS \quad (20)$$

где : *W* – мощность потока, протекающего через сечение шириной в один погонный метр (Вт);  
*m* - масса среды в границах дифференциально малой площади;  
*p* – давление в точке – центре дифференциально малой площади;  
*ρ* – плотность среды в точке – центре дифференциально малой площади

Локации контрольных сечений по длине области потока принимались с учетом предыдущего опыта исследований камер гашения в точках, где поток испытывает определенное воздействие (см. рис. 4). В свою очередь, сечения разделяют область потока на характерные области, гидродинамические процессы в которых напрямую влияют на эффективность работы камеры гашения. Контрольные сечения представлены на рис. 4. Сечения формируют области с индивидуальными специфическими характеристиками гидродинамических процессов, которые уменьшают энергию потока. В результате формируются следующие области :

- 1 – верхняя часть ( верхний подходной канал до входного сечения рабочих ворот);
- 2 – область влияния гасительного экрана;
- 3 – область влияния стенки падения;
- 4 – подэкранная и донная части;
- 5 – область перед балками гашения;
- 6 – область за балками гашения до успокоительного участка.

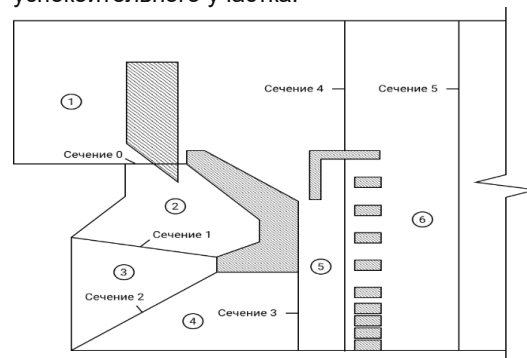


Рис. 4 – Расположение контрольных сечений камеры шлюза

## 2. Результаты расчета, их анализ и практическая апробация

С учетом принятых решений проанализировано изменение структуры потока (таблица) при его движении из-под рабочих ворот после удара о гасительный экран с отражением на стенку падения, последующим отражением на дно и выходом в балки. Таким образом, по результатам исследования для минимизации энергии потока, выходящего из балок гашения предпочтительнее загасить эту энергию в начале пути.

Для количественной характеристики изменения энергии в каждой характерной области потока



проанализируем изменение импульса сил, действующего в границах каждого выделенного объема. Эти уравнения сохранения импульса сил были представлены в [11] и в векторной форме имеют вид :

$$-\iiint_V \frac{d(\rho \vec{v})}{dt} dV = \iint_S |\vec{v}| \cdot (\rho \vec{v}) d\vec{S} + \iint_S (p) d\vec{S} \quad (21)$$

$$+ \iiint_V \rho \vec{q} dV - \iiint_V q_{\sigma_{вн}} dV$$

В левой части представлена проинтегрированная по объему энергия импульса силы (сумма по блоку). Она соответственно складывается из :

- Конвергентного переноса импульса от входного до выходного сечения ;
- Воздействия внешних сил (реакции стен конструкции) на границах области потока;
- Воздействия внешнего силового поля (сила гравитации);
- Воздействия внутренних напряжений в потоке (складывается из турбулентного, кавитационного, аэрационного и пр. усилий).

По результатам моделирования характер изменения осевых проекций каждой компоненты энергии импульса силы в проекциях на оси X и Y по областям (Н·с) и энергии потока по контрольным сечениям (Вт) в процессе наполнения камеры и открытия рабочих ворот в расчете на 5 см ширины камеры, представлены в таблице.

Таблица

**Распределение энергии потока по областям камеры гашения в расчете на 5 см погонной ширины шлюза, Н·с**

		Конвергентный перенос	Внешние силы	Гравитация	Внутренние силы	Осевые суммы	Суммы	Мощность N(Вт)
Вход								0
Область 1	X	654	2877	0	108	3638	3641	
	Y	-649	-7256	8042	-5.2	133		
Сечение 0								8200
Область 2	X	-506	5131	0	98	4722	6496	
	Y	-1560	-6062	12073	-1.2	4451		
Сечение 1								30200
Область 3	X	118	-2515	0	128	-2270	10384	
	Y	-1825	-6062	18017	-1.2	-10126		
Сечение 2								58900
Область 4	X	371	-2515	0	94	-2022	2073	
	Y	-175	-26732	29910	-2.8	-392		
Сечение 3								43950
Область 5	X	370	-3417	0	100	-2839	4745	
	Y	-202	-57742	54025	-4.2	-3923		
Сечение 4								63200
Область 6	X	370	-3417	0	100	-2839	4899	
	Y	-202	-57742	54025	-4.2	-3923		
Сечение 5								12300

Как видно из таблицы основная энергия импульса силы концентрируется в горизонтальном направлении главной оси при движении потока по верхнему каналу в исследуемой области и составляет 3,64 кН·с. Основным источником импульса силы (энергии потока) в область потока является сила тяжести, генерирующая 8.04 кН·с. Но эта величина уравновешивается реакцией дна верхнего подходного канала – 7.26 кН·с. В отличии от вертикальной составляющей, горизонтальная компонента не столь велика и суммируется из 0.65 кН·с когерентной составляющей, 2.88 кН·с реакции внешних усилий и 0.11 кН·с от внешних сил. В результате энергия потока при прохождении первой области растет на 8.20 кВт.

После прохождения водопропускного отверстия под рабочими воротами (сечение 0), поток попадает в область воздействия гасительного экрана, который он покидает через сечение 1. При этом суммарный импульс силы энергии потока увеличивается до 6,5 кН·с. Это результат роста импульса от воздействия гравитационных сил до 12.1 кН·с, в то время как вертикальное усилие со стороны потока уменьшается до 6.06 кН·с. В

результате возникает существенный дисбаланс импульсов, характерный для предыдущей области. Следствием этого становится резкое увеличение импульса энергии потока, сконцентрированной в блоке : с 3.64 кН·с в первом блоке до 6.5 кН·с во втором. Одновременно мощность энергии потока возрастает с 8.20 кВт во входном сечении блока до 30.2 кВт в выходном.

В границах блока 3 (между сечениями 1 и 2) концентрируется максимум энергии потока попадающего в камеру гашения – 10.4 кН·с. С одной стороны, это вызвано тем, что влияние потока силы тяжести в этом блоке максимальное. С другой стороны, часть энергии импульса теряется при ударе о стенку падения и при прохождении через блок 3, поток испытывает максимальные конвергентные изменения. Если в блоках 1 и 2 на конвергентную составляющую приходится 12 – 15 % гасимой энергии, то на блоке 3 эта величина приближается к 20%. В результате действия горизонтальных сил и свободного падения потока, мощность энергии потока, подходящего к повороту в камеру шлюза (сечение 2) возрастает почти в 2 раза.

Движение потока по блоку 4 характеризуется напорным режимом перемещения по трубопроводному участку. Рост энергии со стороны поля гравитации осуществляется в основном за счет объема среды с появлением двух внешних воздействий на поток: реакции дна и реакции от нижней части экрана. Совместно они с избытком перекрывают присутствие гравитационного поля и суммарный импульс сил по области падает до 2.1 кН·с. При этом размеры блока одни из самых больших в камере гашения. В результате энергия потока от сечения 2 до сечения 3 уменьшается с 58.9 кВт до 44.0 кВт.

Следующий блок 5 охватывает предбалочное пространство (начало блока - гасительный экран, конец – балки гашения). Его гидродинамической особенностью является то, что поток вновь возвращается к безнапорному режиму со свободной поверхностью. Это изменение трансформирует преобладание кинетической энергии по области 3 в резкий рост потенциальной энергии. Такой процесс сопровождается повышением отметки свободной поверхности воды, локальным ростом энергии потока и скачкообразным сопряжением двух этих качественно разных потоков. В гидравлике открытых водотоков это явление называется гидравлический прыжок. В результате рост мощности потока составляет 25 % (с 44 кВт до 63.2 кВт).

Последняя область 6 камеры гашения охватывает собой балки гашения и успокоительный участок. Как видно из таблицы существенного изменения импульса энергии сил в блоке по сравнению с соседним не наблюдается (4.75 кН·с и 4.90 кН·с соответственно), а вот мощность энергии потока падает почти в 5 раз с 63.2 до 12.3 кВт. Основная причина такого изменения является то, что на пути потока встают балки гашения и силовой обмен импульсами с ними уменьшает мощность и энергию потока. Дополнительное гашение энергии после балок происходит на успокоительном участке в результате конвергенции потока.

Анализ таблицы однозначно показывает, что определяющим фактором изменения импульса энергии потока является результат воздействия гравитационного поля и внешних силовых реакций со стороны бетонной конструкции, которыми можно управлять. Влияние конвергентности кинематической структуры потока в ряде случаев достигает 10 – 12 % и всегда ориентировано на снижение энергии потока. Еще меньше влияние внутренних напряжений в потоке (турбулентность, кавитация и пр.). Таким образом, принципиально важным становится не только наличие того или иного гасительного элемента, но и его пространственная ориентация и характер взаимодействия с потоком.

Динамика изменений соотношения энергетических импульсов внешних сил по контуру и поля гравитационных сил имеют тенденцию к росту энергии импульса в вертикальном и относительную стабильность в горизонтальном направлениях. Движение по блокам 1-3 (имеющим

вертикальную ориентацию) характеризуется свободным падением воды в вертикальном направлении и ростом энергии и мощности потока за счет гравитационного поля. Локальное снижение импульса сил энергии из-за внешнего воздействия бетонных конструкций лишь на 35-50% понижает энергию потока в границах блоков 2 и 3, что увеличивает мощность потока к сечению 2 почти до 60 кВт.

В блоке 4 ситуация качественно меняется, так как гравитационное поле перестает быть преобладающим источником импульса энергии. Здесь импульсы сил от внешних усилий и гравитационного поля сравниваются, а в блоках 5 и 6 первые начинают преобладать. В результате мощность потока в живых сечениях остается относительно стабильной по течению. Исключением является выходная часть, где за счет балок гашения и успокоительного участка мощность и энергия потока снижаются. Таким образом, для уменьшения негативного воздействия потока на шлюзующее судно посредством сокращения энергии, более перспективным является снижение вертикальной составляющей импульса силы в начальных областях потока. Наиболее очевидным способом решения здесь является установка на пути потока горизонтально ориентированных балок и плит гашения, а также перенаправление струи на вертикальные стенки камеры гашения. При этом принципиального значения не имеет – является эта стенка конструкцией внешнего контура или это дополнительно вводимый элемент. Здесь основным фактором обеспечения высокого качества гашения энергии служит характер взаимодействия гасительного элемента с набегающим потоком. Методические вопросы исследования этих процессов и предварительные результаты исследования работы горизонтально ориентированных балок представлены в работе [11, 12]. Там же показана и принципиальная возможность гашения на отдельных элементах до 95 % энергии потока с помощью добавления горизонтально ориентированных балок в существующую камеру гашения.

### Заключение

С учетом методических наработок [11] и их развития в данной статье в части использования методического обеспечения оценки эффективности работы гасительных элементов, их пространственной ориентации и характера взаимодействия с потоком воды, а так же результатов натурных исследований систематизированных А.М. Гапаевым [1], появляется возможность оптимизации конструктивных решений элементов камер гашения шлюзов. Выполненные оценочные расчеты таких решений элементов гашения энергии потока показывает на наличие возможности улучшения гасительных свойств камеры гашения до 15 % и уменьшения гидродинамической силы действующей на шлюзующее судно, около 10 %.

**Литература**

1. Гапеев, А.М. Совершенствование эксплуатационных качеств судоходных шлюзов с головной системой питания: автореф. дис... док. тех. наук: 05.22.19 / Гапеев Анатолий Михайлович. - Санкт-Петербург, 1999. - 43 с
2. Рябов Г. Г. Определение параметров системы наполнения судоходного шлюза с дополнительным пуском воды поверх ворот: дисс. ... канд. техн. наук / Г. Г. Рябов. - Новосибирск: НГАСУ, 2013. - 144 с.
3. Гапеев, А.М. Влияние отдельных элементов верхней головы шлюза на гидравлические параметры потока / А.М. Гапеев // Труды ЛИИВТа. - 1984. - Гидротехнические сооружения и путевые работы на внутренних водных путях для судоходства, - С.148-155..
4. Липатов И.В., Гидродинамика речных потоков и ее влияние на эксплуатационные параметры судоходных гидротехнических сооружений: методология исследований. - Монография. / И.В. Липатов. - Н.Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2006. - 100с.
5. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар С. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152 с.
6. Hirt, C.W. Volume of Fluid (VOF) method for dynamical free boundaries / C.W. Hirt, B.D. Nicholls// J. Comput. Phys., 1981. № 39, pp.201-225.
7. Липатов, И.В. Математическое моделирование гидродинамических процессов в процессе эксплуатации шлюзованных водных путей. / И.В. Липатов // - Нижний Новгород. - материалы IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. - тезисы докладов. изд. ННГУ. - 2006. т.2, - с. 119
8. El Tahry, S.H. k-e equation for compressible reciprocating engine flows / S.H. El Tahry // - AIAA J. Energy, - 1983. - No. 4, pp. 345-353.
9. Launder, B.E. The numerical computation of turbulent flows / B.E. Launder, D.B. Spalding, //, Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 1974, №3, pp. 269-289.
10. Чичкин О. И. Численное моделирование гидродинамических процессов в камере гашения типового Волго-Донского шлюза / сборник материалов юбилейное международной научно-практической конференции посвященной 110-летию создания гидротехнической лаборатории имени проф. В. Е. Тимонова - Т. 2. – СПГУВК – 2017 - С. 73-81.
11. Липатов И.В. Ситнов А.Н. Чичкин О. И. Аналитический подход к оценке эффективности работы элементов гашения энергии потока в транспортных гидротехнических сооружениях. - www.morintex.ru . - МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 4 (42) Т. 2 - 2018 - С. 170-176.
12. Липатов И.В., Решетников М.А. Математическая модель динамики поведения судна при движении в стесненных условиях (на примере подходного канала шлюза) / И.В. Липатов, М.А. Решетников // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта, № 48 - 2016. - с. 24.

**References**

1. Gapeev, A. M. Improving the performance of locks with the main power system: abstract. dis ... Doc. technical Sciences: 05.22.19. Gapeev Anatoly Mikhailovich. - St. Petersburg, 1999. 43
2. Ryabov G. G. determination of the parameters of the filling system of the shipping gateway with additional start-up of water over the gate: Diss. ... kand. tech. Sciences. Novosibirsk: ngasu, 2013. 144 p.
3. Gapeev, A. M. the Influence of individual elements to the top head lock on the hydraulic parameters flow. Proceedings of Lievt. 1984. Hydraulic structures and track works on inland waterways for navigation, P. 148-155..
4. Lipatov I. V. Hydrodynamics of river flows and its influence on operational parameters of navigable hydraulic structures: research methodology. - Monograph. N. Novgorod: Publishing house FGOU VPO VGAVT, 2006. – 100p.
5. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics. S.-M.: Energoatomizdat, 1984. 152 p.
6. 6 C. W. Hirt. B. D. Nicholls Volume of Fluid (VOF) method for dynamical free boundaries. J. Comput. Phys., 1981. No. 39, pp.201-225.
7. Lipatov, I. V. Mathematical modeling of hydrodynamic processes in the operation of sluice waterways. Nizhny Novgorod. proceedings of the IX all-Russian Congress on theoretical and applied mechanics. thesis of reports. ed. NISES. 2006. vol. 2, p. 119
8. El Tahry, S. H. k-e equation for compressible reciprocating engine flows. AIAA J. Energy, 1983. No. 4, pp. 345-353.
9. Launder B. E. , Spalding D. B. The numerical computation of turbulent flows . Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng. 1974 , no. 3, pp. 269-289.
10. Chichkin O. I. Numerical simulation of hydrodynamic processes in the chamber damping the model of the Volga-don lock collection of materials jubilee international scientific-practical conference dedicated to the 110th anniversary of the hydraulic engineering laboratory named after Professor V. E. Timonov vol.2. SPGUVK 2017 - P. 73-81.
11. Lipatov I. V. Sitnov A. N. Chichkin O. I. Analytical approach to evaluation of efficiency of flow energy damping elements in transport hydraulic structures. - www.morintex.ru . - MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES 4 (42) vol. 2 2018 P. 170-176.
12. Lipatov I.V., Reshetnikov M.A. The ship behavior dynamics mathematical model while driving under the cinstrained conditions (considering the lock approach channel) - Buletin of the Volga State Academyof Water Transport №48 2016r. p. 24

УДК 629.5.024:532.54

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГАСИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОХОДНЫХ ШЛЮЗОВ ВДСКА НА БАЗЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Игорь Викторович Липатов**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры водных путей и гидротехнических сооружений  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова 5  
e-mail: i\_lipatov@mail.ru

**Николай Станиславович Отделкин**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры прикладной механики и подъемно-транспортных механизмов  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова 5  
e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

**Анатолий Сидорович Слюсарев**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры прикладной механики и подъемно-транспортных механизмов  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова 5  
e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

**Олег Ильич Чичкин**

Заведующий лабораторией кафедры водных путей и гидротехнических сооружений  
Волжский государственный университет водного транспорта  
603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова 5  
e-mail: chichkin\_95@mail.ru

### Аннотация

В статье представлены результаты исследования новых конструктивных решений камер гашения для судоходных камер Волго-Донского судоходного канала. Предмет исследования - энергия потока покидающего гасительные элементы и успокоительный участок при заполнении камеры шлюза с головной системой питания.

Критерием оценки эффективности работы гасительных элементов принята минимизация энергии потока покидающего успокоительный участок в сравнении с существующей конструкцией. Методом решения задачи является численное моделирование гидродинамики потока. В качестве учитываемых факторов при составлении баланса энергии приняты: конвергенция потока внутри камеры гашения; внешние источники массы среды; внешние усилия по контуру исследуемой области; гравитация и совокупность внутренних сил (кавитация, аэрация, сжимаемость потока).

Кроме того представлены результаты исследования восьми вариантов изменения конструкции и гасительных элементов. Основной акцент, сделан на использование горизонтально ориентированных балок. В результате предложен новый вариант конструкции гасительных элементов, который позволяет сократить время наполнения камеры шлюза на 8-12 %.

**Ключевые слова:** Судоходный шлюз, камера гашения, уравнения Навье-Стокса, закон сохранения импульса, балка гашения, потеря энергии, шлюзование судна.

## IMPROVEMENT OF DAMPING ELEMENTS OF VOLGA-DON SHIPPING LOCKS ON NUMERICAL SIMULATION BASE

**Igor V. Lipatov**

the associate professor, Dr.Sci.Tech  
professor of the Department of waterways and hydraulic engineering  
Volga state University of water transport  
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova st.,5

**Nikolai St. Otdelkin**

the professor, Dr.Sci.Tech  
Professor of the Department of Applied Mechanics and hoisting mechanisms  
Volga State University of Water Transport  
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova st., 5  
e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

**Anatoliy S. Slyusarev**

the professor, Dr.Sci.Tech  
Professor of the Department of Applied Mechanics and hoisting mechanisms  
Volga State University of Water Transport  
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova st., 5  
e-mail: pmptmvgavt@yandex.ru

**Oleg I. Chichkin**

Head of the Laboratory of the Department of Waterways and Hydrotechnical Structures  
Volga State University of Water Transport  
603950, Nizhny Novgorod, Nesterova st., 5  
e-mail: chichkin\_95@mail.ru

**Abstract**

The article presents the study results of new design solutions of stilling basin for navigable chamber of the Volga-Don shipping canal. The subject of the study is the flow energy leaving the damping elements and the stilling section when filling the chamber of the gateway with the head power system.

The criterion for evaluating the efficiency of the damping elements is the minimization of the flow energy leaving the stilling section in comparison with the existing design. A method for solving the problem is the numerical simulation of flow hydrodynamics. The following factors were taken into consideration when compiling the energy balance: flow convergence inside the stilling basin; external sources of mass; external efforts along the contour of the studied area; gravity and the aggregate of internal forces (cavitation, aeration, compressibility of the flow).

In addition, the results of the study of eight options for changing damping elements design are presented. The main emphasis is made on the use of horizontally oriented beams. As a result, a new design option of the damping elements is proposed, which allows to reduce the filling time of the gateway chamber by 8-12%.

**Keywords:** shipping lock, stilling basin, Navier-Stokes equations, law of conservation of momentum, damping beam, energy loss, ship lockage

**Введение**

Водный транспорт является частью хозяйственного комплекса страны. Его устойчивое и надёжное функционирование напрямую влияет на характер логистических связей и определяет динамику развития экономики страны. Доминирующим фактором работы внутреннего водного транспорта является его путёвая инфраструктура: водные пути; судоходные гидросооружения; портовое хозяйство и так далее.

Совершенствованию работы береговой инфраструктуры водного транспорта были посвящены работы большого числа ученых ФГБОУ ВО «ВГУВТ» [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Развернутый анализ литературы показал, что наиболее проблемным звеном в общей структуре является работа судоходных шлюзов. Большинство шлюзов в нашей стране имеют головную систему питания. Ускорение судопропуска в таких системах напрямую зависит от скорости подачи воды при наполнении камеры шлюза. Но в случае увеличения скорости наполнения, резко интенсифицируются волновые процессы в камере шлюза и значительно снижается безопасность процесса отстоя судна. Для оптимизации двух выше названных факторов, перспективным путем является улучшение гашения потока поступающего через верхнюю го лову в камеру шлюза.

Традиционным путем решения этой задачи было проведение лабораторных исследований на масштабной модели. Но в последние годы этот подход показал свои недостатки, и ему на смену все более активно идет численное моделирование [12, 16, 17].

Помимо низкой себестоимости исследований, численное моделирование позволяет на принципиально новом уровне проанализировать гидродинамические процессы в потоке, заполняющем камеру шлюза, наметить перспективные пути совершенствования гидродинамики процесса наполнения камер. В работе [16], была показана принципиальная возможность снижения до нуля мощности энергии потока падающего из верхнего бьефа в нижний. Одним из путей её достижения является помещение го

ризонтально ориентированной балки гашения под струю падающего потока.

**1. Описание задачи и постановка исследований**

Целью данной работы стало исследование путей совершенствования конструкции гасительных элементов в камере гашения судоходного шлюза. При этом, основной акцент методических исследований [16] был сделан на исследование применения дополнительных горизонтально ориентированных балок гашения. В качестве отправной точки использовано решение системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса дополненное уравнением ВО Ф скаляра для мониторинга поведения свободной поверхности на границе фаз "вода-воздух" [13, 15]. Учёт турбулентности реализуется с помощью  $k$ - $\omega$  гипотезы турбулентности. Граничные и начальные условия к задаче представлены и описаны [18, 19, 20].

Учитывая опыт лабораторных исследований, численные эксперименты проводились на фрагментарных моделях шлюза в квази стационарном состоянии. Рассматривались варианты открытия рабочих ворот в начальной фазе маневрирования, соответствующими этим этапам открытия глубинами в камере шлюза. Эффективность работы модернизированной камеры гашения оценивалась по величине суммарного импульса выходной энергии в потоке покидающего камеру гашения и успокоительный участок. Чем выходная энергия импульса сил меньше, тем работа гасителя эффективнее. Это обеспечивает снижение волнового воздействия на шлюзующее судно и гарантирует спокойный режим отстоя судна в камере. Причём учитывая нелинейность зависимости этой величины, окончательная оценка выполнялась на базе средневзвешенного значения за весь период маневрирования рабочих ворот в неподтопленном режиме истечения. Такая ситуация имеет место при открытии ворот до 1 метра, для существующих сооружений.

Величина гашения энергии потока покидающего успокоительный участок и перетекающий в камеру шлюза, складывается из ряда компонент. Домини

рующими среди них являются: конвергентный перенос импульса энергии от входного до выходного сечения; воздействие внешних сил (реакции стен конструкции и дополнительных гасящих элементов) на границах области потока; воздействие внешнего силового поля (сила гравитации); воздействие внутренних напряжений в потоке (турбулентные, кавитационные, аэрационные и прочие). Более подробное балансное уравнение импульса сил рассмотрено в работе [16].

## 2. Результаты расчётов и практическая апробация

Базируясь на существующих наработках [10,14], а так же результатах работ систематизированных А.М. Гапеевым [9,11] был рассмотрен ряд новых конструктивных решений для камер гашения шлюзов с головной системой питания. Основная идея модернизации состоит в том, что дополнительное гашение энергии потока воды, осуществляется с помощью горизонтально ориентированных балок взаимодействующих с падающим потоком воды во входной части камеры гашения. Основной проблемой модернизации элементов является необходимость обеспечения беспрепятственного маневрирования рабочих ворот.

На первом этапе исследовался вариант модернизации существующей камеры гашения, по средствам разделения гасительного экрана на дополнительную стенку падения и горизонтальную балку гашения (см. рис. 1). Как показали предварительные исследования - закручивающийся циркуляционный поток в верхней части камеры гашения достаточно активно, в виде турбулентных и конвергентных сил, гасит энергию потока. Помимо этого, движущийся поток, после удара о балку гашения дополнительно диссипирует энергию в потоке.

Недостатком этого варианта является то что поток воды и энергия сконцентрированная в нем в основном обтекают горизонтальную балку гашения слева по ходу течения. Таким образом, большая масса потока минует гасительные элементы и энергия воздействует на шлюзующее судно, существенно ухудшая его условия отстоя.

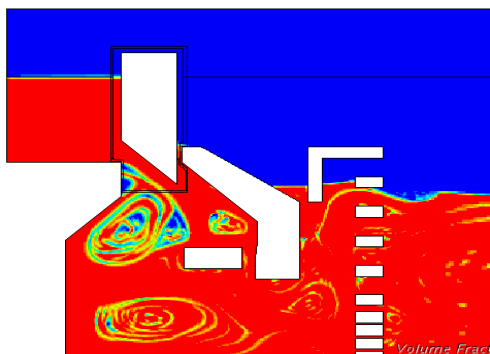


Рис. 1 Вариант гашения одной балкой и стенкой падения.

Для устранения этого недостатка, предлагается добавить вторую балку ориентированную на взаимодействие с вертикально падающим потоком, который будет соскакивать с верхней дополнительной горизонтальной балки. Помимо появления дополни-

тельного усилия реакции, сформируются турбулентные зоны, в которых энергия будет диссипировать как за счет конвергенции потока, так и за счет турбулизации. (см. рис. 2).

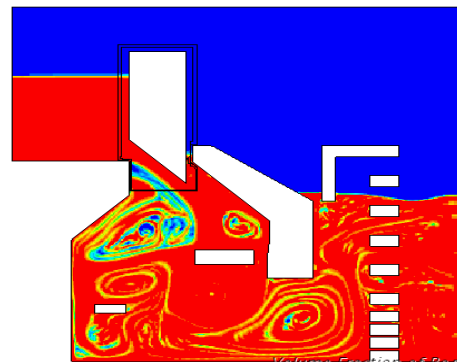


Рис. 2 Две смещенные балки относительно гасительного экрана

Базируясь на работах Гапеева А.М. [9] был рассмотрен вариант увеличенным межбалочным расстоянием у нижних балок (рис. 3), тем самым проверили старую теорию Семанова Н.В., Баланина В.В., о том, что в основном энергия гасится в балочной решетке. Как видно из таблицы результаты математического моделирования говорят о другом.



Рис. 3 Увеличенное расстояние между нижних гасительных балок 1-2-3-4

В ходе исследований стало очевидно, что в начальный момент времени поток (когда выходит из-под затвора) истекает свободно. После удара поток о стенку и дно камеры он перенаправляется в пространство под балками, на участке под гасительным экраном, и движется в напорном режиме. Поток выходит из под экранного пространства канала под напором на свободное пространство в предбалочную область камеры гашения. В результате прыжкового сопряжения двух этих участков потока, начинается формироваться и подкручиваться валец на свободной поверхности у верхней балки гашения. Согласно данным Гапеева А.М., это генерирует дополнительный уклон и поднятия уровня на свободной поверхности. Чтобы попытаться избавиться от этого, был рассмотрен вариант гасительного экрана в виде конуса (рис. 4), затопливающий гидравлический прыжок в конической части под балочного пространства.



Рис. 5 Две балки с колодцем

Далее развивая идею водобойного колодца, смоделировали вариант с увеличенной длиной колодца, заходящего под балочную решетку (рис. 6).



Рис. 6 Две балки с удлиненным колодцем

Для исследования влияния гидравлического прыжка перед балкой гашения и его роли в гидродинамических процессах камеры гашения, был рассмотрен вариант смещения экрана и верхней балки до уровня существующей балки балочной решетки (рис. 7). Это сузило выходной канал, что привело к росту энергии на выходе из камеры.

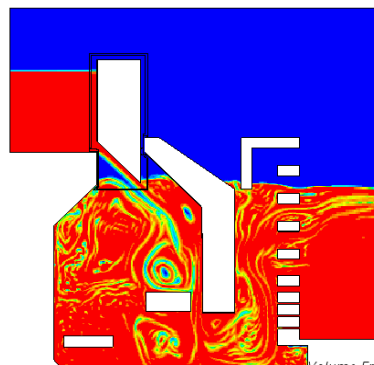


Рис. 7 Удлиненный колодец и вытянутый экран

В завершении был рассмотрен вариант увеличения площади контакта ударной струи с бетоном камер в результате роста области консоли и соответствующей силы взаимодействия. Основной целью вновь стал рост поглощения энергии (рис. 8). Но это лишь привело к тому, что поток из под рабочих ворот не успевал беспрепятственно пройти в выходную область и стал заполнять предэкранное пространство. В результате подтопленный режим истечения стал наступать существенно раньше и это самым негативным образом сказалось на увеличении и времени наполнения камеры.

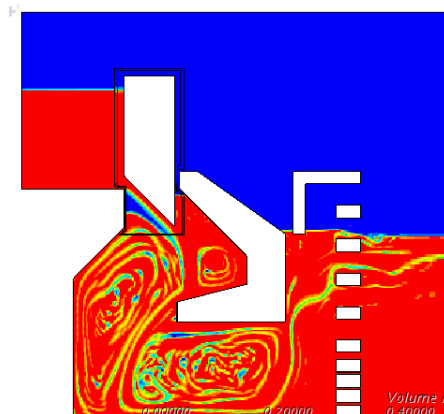


Рис. 8 Удлиненная консоль экрана

Так как на практике основное значение имеют начальные этапы маневрирования ворот, то исследование проводилось при четырех значениях открытия конструкции ворот: 0.25, 0.5, 0.75 и 1 метр. Моделировался поток на фрагментарных моделях в квази стационарном режиме. Уровень воды в камере шлюза обеспечивался локальным искусственным подпором, а его величина определялась гидрографом существующего шлюза. Для обеспечения требуемой глубины используются принципы моделирования фрагментарных моделей, в которых необходимая глубина  $h$  обеспечивается созданием локального подпора с помощью водослива. Для удобства разбивки расчетной сетки мы использовали схему в одослива с широким порогом.

В процессе моделирования исследовался окончательный суммарный импульс энергии сил, который присутствует в потоке после выхода из камеры гашения и прохождения успокоительного участка. Результаты численного моделирования новых конструкций представлены в таблице. Для каждой из 8 новых и существующей конструкции камеры гашения

я определялась энергия, перетекающая в камеру шлюза через величину суммарного импульса сил в потоке. Величина суммарного импульса определялась для 4 этапов маневрирования (открытие ворот на 0.25, 0.5, 0.75 и 1 метр соответственно). Помимо

непосредственной величины импульса, в таблице представлено сравнение уменьшения/увеличения энергии потока в процентах, относительно существующей конструкции камеры гашения.

Таблица

**Импульс в потоке при различном открытии ворот (кН·с на 5 погонных см ширины)**

гаситель открытие(м)	Исход.	Плита	Плита + балка	3 НБ ув. пор ог	НГ конус	Колодец	Удлин. Ко лодец	Кол + сме щ. Эк	Удлин. экран
.25	<b>5 274</b>	<b>4 383</b> (-16,8%)	<b>4 690</b> (-11,1%)	<b>5 624</b> (+6,63%)	<b>6 344</b> (+20,2%)	<b>5 052</b> (-4,2%)	<b>5 679</b> (+7,7%)	<b>5 845</b> (+10,8%)	<b>5 658</b> (+7,3%)
.5	<b>6 207</b>	<b>7 246</b> (+16,7%)	<b>3 952</b> (-36,3%)	<b>9 369</b> (+50,9%)	<b>9 374</b> (+51%)	<b>7 416</b> (+19,5%)	<b>7 453</b> (+20%)	<b>9 701</b> (+56,3)	<b>7 635</b> (+23%)
.75	<b>5 619</b>	<b>5 023</b> (-10,6%)	<b>4 998</b> (-11%)	<b>7 083</b> (+26%)	<b>9 851</b> (+75,3%)	<b>7 600</b> (+35,2%)	<b>7 886</b> (+40,4%)	<b>10 105</b> (+79,8%)	<b>7 329</b> (+30,4%)
1	<b>5 024</b>	<b>5 475</b> (+8,97%)	<b>4 948</b> (-1,51%)	<b>5 889</b> (+17,2%)	<b>6 796</b> (+35,2%)	<b>5 351</b> (+6,5%)	<b>5 393</b> (+7,3%)	<b>6 731</b> (+33,9%)	<b>7 403</b> (+47,3%)
Средний %		-0,43%	-15,1%	+25%	+45,4%		+14,25%	+18,85%	+45,2%

### Выводы

Наилучшие показатели гашения энергии, как видно из таблицы получены у конструкции с двумя гасительными балками относительно гасительного экрана (рис. 2). При этой конструкции суммарная энергия меньше на 15.1% от исходной. Оценочные расчеты снижения энергии потока показывают, что это вызовет ощутимое снижение уклонов свободной поверхности в камере шлюза и улучшение усл

овий отстоя судна в процессе шлюзования. С другой стороны уменьшение гидродинамической силы действующей на шлюзующееся судно позволяет у величение скорость поднятия затвора, а как результат – сократить время наполнения камеры шлюза. При шлюзовании крупнотоннажного судна типа Во лго-Дон с водоизмещением 5000 тонн, появляется возможность сократить время наполнения камеры на 45-50 секунд (уменьшить на 8-12 %).

### Литература

1. Клементьев А.Н. Математическая модель плоского движения судна при заходе в камеру шлюза предельно малой ширины. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. (ВГУВТ) 2016. № 48. С.
2. Кузьмичев И.К., Корнев А.Б., Малышкин А.Г. Задачи научных исследований в области пассажирских перевозок на реч. Транспорте. Вестник ВГУВТ. 2017. № 50. С. 182-190.
3. Платов А.Ю., Васильева О.Ю. Анализ применимости методов расчете коэффициента остаточного сопротивления для судов внутреннего плавания при эксплуатационно-экономическом обосновании новых судов. Вестник ВГУВТ. 2019. № 60. с. 193-201
4. Сергеев С.Н., Уртминцев Ю.Н., Железнов С.В., Малышкин А.Г. Концептуальная модель оценки целесообразности развития воднотранспортных систем на водных путях местного значения. Вестник ВГУВ 2019. № 60. с. 159-172
5. Виноградов В.Н., Ивановский Н.В. Синтез алгоритма управления судном в заданной акватории на основе комплексного критерия риска. Вестник ВГУВТ. 2019. № 59. с.158-165
6. Веселов Г.В., Карташов М.В., Минеев В.И.. Современное состояние пассажирских перевозок российской федерации. Вестник ВГУВТ. 2019. № 58. с.143-150
7. Домнина О.Л., Иванов М.В., Митрошин С.Г., Исанин К.А. Обоснование организации высокоскоростных водных перевозок пассажиров в приволжском федеральном округе. Вестник ВГУВТ 2018. № 57, с.191-199.
8. Цверов В.В., Левочкина М.А. Исследование факторов, дестабилизирующих сроки доставки на речном транспорте. Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2018. № 58. с. 135-140.
9. Гапеев, А.М. Совершенствование эксплуатационных качеств судоводных шлюзов с головной системой питания: автореф. дис... док. тех. наук: 05.22.19 / Гапеев Анатолий Михайлович. - Санкт-Петербург, 1999. – 4 с
10. Рябов Г. Г. Определение параметров системы наполнения судоводного шлюза с дополнительным пуском воды поверх ворот: дисс. ... канд. техн. наук / Г. Г. Рябов. - Новосибирск: НГАСУ, 2013. - 144 с.
11. Гапеев, А.М. Влияние отдельных элементов верхней головы шлюза на гидравлические параметры потока / А.М. Гапеев // Труды ЛИИВТа. - 1984. - Гидротехнические сооружения и путевые работы на внутренних водных путях для судоходства, - С.148-155.
12. Липатов И.В., Гидродинамика речных потоков и ее влияние на эксплуатационные параметры судоводных гидротехнических сооружений: методология исследований. - Монография. / И.В. Липатов. - Н.Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО ВГАВТ, 2006. - 100с.
13. Липатов, И.В. Математическое моделирование гидродинамических процессов в процессе эксплуатации шлюзованных водных путей. / И.В. Липатов // - Нижний Новгород. - материалы IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. - тезисы докладов. изд. ННГУ. - 2006. т.2, - с. 119
14. Кривошей В. А. Увеличение пропускной способности судоводных шлюзов с головной системой питания: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. А. Кривошей; СПГУВК. — М.: МГАВТ, 2000.
15. Чичкин О. И. Численное моделирование гидродинамических процессов в камере гашения типового Волго-



Донского шлюза / сборник материалов юбилейное международной научно-практической конференции посвященной 110-летию создания гидротехнической лаборатории имени проф. В. Е. Тимонова - Т. 2. – СПГУВК – 2017 - С. 73-81.

16. Липатов И.В. Ситнов А.Н. Чичкин О. И. Аналитический подход к оценке эффективности работы элементов гашения энергии потока в транспортных гидротехнических сооружениях. МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ/ 4 (42) Т. 2 - 2018 - С. 170-176.
17. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар С. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152 с.
18. Hirt, C.W. Volume of Fluid (VOF) method for dynamical free boundaries / C.W. Hirt, B.D. Nicholls// J. Comput. Phys., 1981. № 39, pp.201-225.
19. El Tahry, S.H. k-e equation for compressible reciprocating engine flows / S.H. El Tahry // - AIAA J. Energy, - 1983. - No. 4, pp. 345-353.
20. Launder, B.E. The numerical computation of turbulent flows / B.E. Launder, D.B. Spalding, //, Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 1974, №3, pp. 269-289.

#### References

1. Klement'ev A.N. Matematicheskaya model' ploskogo dvizheniya sudna pri zakhode v kameru shlyuza predel'no maloy shiriny. Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. (VGUVT) 2016. № 48. p. 220-224.
2. Kuz'michev I.K., Kornev A.B., Malyshev A.G. Zadachi nauchnykh issledovaniy v oblasti passazhirskikh perevozk na rech. Transporte. Vestnik VGUVT. 2017. № 50. p. 182-190.
3. Platov A.Yu., Vasil'eva O.Yu. Analiz primenimosti metodov rascheta koeffitsienta ostatochnogo so-protivleniya dlya sudov vnutrennego plavaniya pri ekspluatatsionno-ekonomicheskom obosnovanii novykh sudov. Vestnik VGUVT. 2019. № 60. p. 193-201
4. Sergeev S.N., Urtmintsev Yu.N., Zhelezov S.V., Malyshev A.G. Kontseptual'naya model' otsenki tsele-soobraznosti razvitiya vodnotransportnykh sistem na vodnykh putyakh mestnogo znacheniya. Vestnik VGUVT 2019. № 60. s. 159-172
5. Vinogradov V.N., Ivanovskiy N.V. Sintez algoritma upravleniya sudnom v zadannoy akvatorii na osnove kompleksnogo kriteriya riska. Vestnik VGUVT. 2019. № 59. p.158-165
6. Veselov G.V., Kartashov M.V., Mineev V.I.. Sovremennoe sostoyanie passazhirskikh perevozk rossiyskoy federatsii. Vestnik VGUVT. 2019. № 58. p.143-150
7. Domnina O.L., Ivanov M.V., Mitroshin S.G., Isanin K.A. Obosnovanie organizatsii vysokoskorostnykh vodnykh perevozk passazhirov v privolzhskom federal'nom okruge. Vestnik VGUVT 2018. № 57, s.191-199.
8. Tserov V.V., Levochkina M.A. Issledovanie faktorov, destabiliziruyushchikh sroki dostavki na rechnom transporte. Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. 2018. № 58. s. 135-140.
9. Gapeev, A.M. Sovershenstvovanie ekspluatatsionnykh kachestv sudokhodnykh shlyuzov s golovnoy sistemoy pitaniya: avtoref. dis... dok. tekhn. nauk: 05.22.19 / Gapeev Anatolii Mikhaylovich. - Sankt-Peterburg, 1999. 4 p
10. Ryabov G. G. Opredelenie parametrov sistema napolneniya sudokhodnogo shlyuza s dopolnitel'nym puskom vody poverkh vorot: diss. ... kand. tekhn. Nauk. Novosibirsk: NGASU, 2013. 144 p.
11. Gapeev, A.M. Vliyanie ot del'nykh elementov verkhney golovy shlyuza na gidravlicheskie parametry potoka. Trudy LIIVTa. 1984. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya i putevye raboty na vnutrennikh vodnykh putyakh dlya sudokhodstva, - p.148-155.
12. Lipatov I.V., Gidrodinamika rechnykh potokov i ee vliyanie na ekspluatatsionnye parametry sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy: metodologiya issledovaniy. Monografiya. N.Novgorod: Izd-vo FGOU VPO VGAVT, 2006. – 100p.
13. Lipatov, I.V. Matematicheskoe modelirovaniye gidrodinamicheskikh protsessov v protsesse ekspluatatsii shlyuzovannykh vodnykh putey. Nizhniy Novgorod. - materialy IX Vserossiyskiy s"ezd po teoreticheskoy i prikladnoy mekhanike. - tezisy dokladov. izd. NNGU. 2006. t.2, p. 119
14. Krivoshey V. A. Uvelichenie propusknoy sposobnosti sudokhodnykh shlyuzov s golovnoy sistemoy pitaniya: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk; SPGUVK. M.: MGAVT, 2000.
15. Chichkin O. I. Chislennoe modelirovaniye gidrodinamicheskikh protsessov v kamere gasheniya tipovogo Volgo-Donskogo shlyuza / sbornik materialov yubileynoe mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii posvyashchennoy 110-letiyu sozdaniya gidrotekhnicheskoy laboratorii imeni prof. V. E. Timonova T. 2. SPGUVK 2017 - p. 73-81.
16. Lipatov I.V. Sitnov A.N. Chichkin O. I. Analiticheskiy podkhod k otsenke effektivnosti raboty elementov gasheniya energii potoka v transportnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh. MORSKIE INTELLEKTUAL'NYE TEKhnOLOGII. 4 (42) T.2 2018 p. 170-176.
17. Patankar S. Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti S. Patankar S. M.: Energoatomizdat, 1984. 152 s.
18. Hirt C.W., , B.D. Nicho Volume of Fluid (VOF) method for dynamical free boundaries J. Comput. Phys., 1981. № 39, pp.201-225.
19. El Tahry, S.H. k-e equation for compressible reciprocating engine flows AIAA J. Energy, 1983. - No. 4, pp. 345-353.
20. Launder B.E. , D.B. Spalding The numerical computation of turbulent flows. Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 1974, №3, pp. 269-289.

УДК 514.8

## ТОЧНЫЙ РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

**Александр Афанасьевич Карпачёв**

доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой «Математика»

Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова  
690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6  
e-mail: k327063@yandex.ru

**Юрий Александрович Гренков**

кандидат технических наук, доцент

преподаватель кафедры «Морское подводное вооружение»

Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова  
690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6  
e-mail: grenkovst@mail.ru

**Владислав Николаевич Буравлёв**

заместитель начальника кафедры «Морское подводное вооружение»

Тихоокеанское высшее военно-морское училище им. адм. С.О. Макарова  
690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6  
e-mail: buravvlad@yandex.ru

### Аннотация

Рассматривается задача расчета оптимальных параметров цилиндрических оболочек, используемых для создания прочных корпусов малых глубоководных подводных аппаратов. Как известно, при расчёте критического давления таких оболочек используется теория расчетов осесимметричных тел вращения произвольной формы, основанная на гипотезах Кирхгофа и предположениях об однородности материалов изготовления. В этом случае главная задача сводится к решению системы уравнений равновесия в частных производных восьмого порядка. Для цилиндрических оболочек ввиду принятых допущений эта система уравнений преобразуется в линейную алгебраическую систему. Известные формулы для расчёта критического давления получены из данной системы уравнений на основе дополнительных допущений. Однако из этой системы можно найти точное значение критического давления без каких либо дополнительных допущений и упрощений. Предложенный метод позволяет решать задачу оптимизации основных параметров цилиндрической оболочки прочного корпуса.

**Ключевые слова:** параметры цилиндрических оболочек, прочный корпус, критическое давление, оптимизация параметров оболочки, алгебраическая система уравнений

## THE PRECISE CALCULATION OF CYLINDRIC SHELL PARAMETERS

**Aleksandr A. Karpachev**

Professor, Dr. Sci. Tech.

Director of department of Mathematics

Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov  
Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia  
e-mail: k327063@yandex.ru

**Yury A. Grenkov**

Associate professor, Cand. Sci. Tech.

Lecturer of department of Naval underwater armament  
Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov  
Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia  
e-mail: grenkovst@mail.ru

**Vladislav N. Buravlev**

Deputy director of department of Naval underwater armament

Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov  
Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia  
e-mail: buravvlad@yandex.ru

### Abstract

The problem of calculating the optimal parameters of cylindrical shells used to create durable hulls of small deep-sea underwater vehicles is considered. As is known, when calculating the critical pressure of such shells, the theory of calculating axisymmetric bodies of revolution of arbitrary shape is used, based on Kirchhoff hypotheses and assumptions about the homogeneity of manufacturing materials. In this case, the main problem is reduced to solving the system of equilibrium equations in partial derivatives of the eighth order. For cylindrical shells, in view of the accepted assumptions, this system of equations is transformed into a linear algebraic system. Known formulas for calculating the critical pressure are obtained from this system of equations based on additional assumptions. However, from this system you can find the exact value of the critical pressure without any additional assumptions and simplifications.

The proposed method allows us to solve the problem of optimizing the main parameters of the cylindrical shell of a durable body.

**Key words:** parameters of cylindrical shells, robust housing, critical pressure, optimization of shell parameters, algebraic system of equations

### Введение

В настоящее время все множество архитектурных схем необитаемых подводных аппаратов (НПА) по взаимному расположению легких конструкций, прочных корпусов и блоков плавучести может быть сведено к трем основным схемам:

а) НПА, построенные по технологии производства торпедного оружия, где прочный корпус полностью формирует внешние обводы аппарата и обеспечивает его плавучесть;

б) НПА с одним крупным прочным контейнером, формирующим среднюю, цилиндрическую, часть аппарата и обеспечивающим его плавучесть. К контейнеру крепятся легкие оконечности, заполняемые водой, где располагается часть нагрузки НПА, выполненная в погружном варианте;

в) НПА, построенные по модульной технологии, где используется большое количество прочных контейнеров, а дополнительная архимедова сила обеспечивается блоками плавучести, выполненными из синтактика.

Задача проектирования прочного корпуса оптимальной конструкции, т. е. обладающей достаточной прочностью при минимальном весе, для подводных аппаратов была исследована в ряде работ [1 – 6].

В практических случаях расчеты параметров прочного корпуса основаны на методах расчета прочности и устойчивости цилиндрических оболочек вращения при следующих заданных параметрах:

$l$  - длина, м.;

$r$  - внешний радиус, м.;

$H$  - глубина погружения, м.;

$K_3$  - коэффициент запаса (больше единицы).

При расчетах используются следующие физические и механические характеристики материала изготовления оболочки:

$\sigma_T$  - предел текучести,  $H/M^2$ ;

$E$  - модуль упругости (Юнга),  $H/M^2$ ;

$\mu$  - коэффициент Пуассона;

$\rho_m$  - удельная плотность материала.  $K/M^3$ .

На первом этапе определяется толщина цилиндрической оболочки по прочности, (или по пластической устойчивости) по известной формуле:

$$\delta = \frac{K_3 \cdot P_p}{\sigma_T} r,$$

где  $P_p$  – расчетное давление, а  $r = b - \delta/2$  – срединный радиус, а  $b$  - внешний радиус оболочки. В соответствии с правилами Российского морского регистра расчетное давление определяется по формуле

$$P_p = \rho_B \frac{H + \Delta H}{100000},$$

где  $\rho_B$  – плотность морской воды,  $\Delta H$  – запас по глубине. Запас необходимо выбирать не менее 50 м. Значение плотности морской воды зависит от заданной глубины погружения  $H$  и вычисляется по следующей формуле

$$\rho_B(H) = 0,03(H \cdot 10^{-3})^2 + 4,63(H \cdot 10^{-3}) + 1028,04.$$

Данная формула была получена в результате аппроксимации экспериментальных данных.

По результатам исследований было установлено, что значение коэффициента запаса  $K_3$  должно меняться в зависимости от расчетной глубины: чем больше глубина погружения, тем больше должен быть и коэффициент запаса. Результаты представлены в виде линейной зависимости

$$K_3 = 0,00005 \cdot H + 1,25.$$

После подстановки указанных значений уточняется толщина оболочки:

$$\delta = \frac{K_3 \cdot P_p}{\sigma_T} (b - \delta/2).$$

Далее определяется основная формула для расчета толщины оболочки:

$$\lambda = \frac{K_3 \cdot P_p}{\sigma_T}; \quad \delta = \frac{\lambda \cdot b}{1 + 0,5\lambda}.$$

По этим данным рассчитывается срединный радиус  $r$  и  $a$  - внутренний радиус оболочки:

$$r = b - \delta/2; \quad a = b - \delta.$$

Необходимо отметить, что определенная по формуле прочности толщина  $\delta$  цилиндрической части оболочки еще не гарантирует её от разрушения. Как известно, гидростатическое давление  $P_p$ , вызывает внешнее обжатие оболочки.

В результате обжатия возникают значительные сжимающие напряжения.

В этих условиях параметры цилиндрической оболочки необходимо определять таким образом, чтобы величина критического давления  $P_{kp}$  была не меньше величины расчетного давления  $P_p$ .

Для проверки цилиндрической оболочки на устойчивость необходимо рассчитать критическое давление  $P_{yc}$ , при котором оболочка не изменит своей формы, т.е. не подвергнется какой-либо деформации.

Для расчета этого давления существует несколько практических формул, например, зависящих от условного типа оболочки [2, 4].

В работах [5, 6] приводится формула для расчета давления, при котором происходит потеря устойчивости цилиндрической оболочки, не подкрепленной шпангоутами:

$$P_{ycm}(n) = \min_n \frac{\lambda^2 E \delta / b}{(0,5b/r + \mu)\lambda^2 + (1 + 0,5\mu b/r)n^2} \times \left[ \frac{\lambda^2}{(\lambda^2 + n^2)^2} + \frac{r^2}{12(1-\mu^2)r^2} \frac{(\lambda^2 + n^2)^2}{\lambda^2} \right]; \quad \lambda = \pi r / l.$$

Здесь величина  $P_{yc}$  зависят от значения  $n$  (число полуволн по периметру оболочки). Однако эта формула является очень приближительной.

Сравнение результатов вычислительных расчетов масс цилиндрических оболочек (корпусов) с фактическими массами прочных корпусов существующих подводных аппаратов показывает, что погрешность расчетных формул составляет до 20 % для диапазона глубин от 500 до 3000 м. и ниже. Для подводных аппаратов данная погрешность является существенной.

### 1. Система уравнений равновесия

Для решения конкретных задач расчета прочности и устойчивости оболочек вращения, как правило, используются формулы расчетов осесимметричных тел вращения произвольной формы [1,2,4]. Данная задача решается в перемещениях, при этом используется система трех уравнений равновесия, выраженная через усилия и моменты, которые, в свою очередь, определяются через относительные деформации срединной поверхности. Выполнив замены компонентов деформации перемещениями срединной поверхности оболочки, приходят к системе трех уравнений равновесия с тремя неизвестными перемещениями  $U, V, W$ .

После задания граничных условий, система уравнений легко интегрируется. Однако она имеет восьмой порядок, так как содержит уравнения в частных производных восьмого порядка.

Ввиду принятых допущений для цилиндрических оболочек система уравнений равновесия в перемещениях преобразуется в линейную дифференциальную систему, которая имеет следующий вид: [2,4]:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1-\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{1+\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial \xi \partial \varphi} - \mu \frac{\partial w}{\partial \xi} + \\ & + p \left( \frac{\partial^2 v}{\partial \xi \partial \varphi} - \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial w}{\partial \xi} \right) = 0; \\ & \frac{1+\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \varphi} + \frac{1-\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial w}{\partial \varphi} + \\ & + \theta \cdot \left( (1-\mu) \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} + \frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} \right) + \\ & + p \left( -\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \varphi} \right) = 0; \\ & \theta \cdot \left( \frac{\partial^3 v}{\partial \varphi^3} - (2-\mu) \frac{\partial^3 v}{\partial \xi^2 \partial \varphi} + \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} \right) - \\ & - \frac{\partial v}{\partial \varphi} + w - \mu \frac{\partial u}{\partial \xi} + p \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right) = 0. \end{aligned} \right.$$

Здесь вводятся дополнительные величины:

$$\theta = \frac{\delta^2}{12r^2}; \quad p = \frac{P_{yc}}{E \delta} (1-\mu^2).$$

Начало координат ( $x, \varphi$ ) выбирается на ребре оболочки. Решение системы дифференциальных уравнений устойчивости ищется в виде произведений тригонометрических функций по переменным  $\xi$  и  $\varphi$ :

$$u = A \cdot \cos(\lambda_m \xi) \cdot \cos(n \varphi);$$

$$v = B \cdot \sin(\lambda_m \xi) \cdot \sin(n \varphi);$$

$$w = C \cdot \sin(\lambda_m \xi) \cdot \cos(n \varphi).$$

$$\lambda_m = m \cdot \pi r / l; \quad m, n = 1, 2, 3, \dots$$

Очевидно, что функции  $V$  и  $W$  удовлетворяют следующим граничным условиям:

$$v|_{\xi=0} = 0; \quad w|_{\xi=0} = 0.$$

После подстановки выражений для выбранных функций в основную систему уравнений устойчивости, все уравнения системы преобразуются в произведение, содержащее ненулевой множитель в виде произведения тригонометрических функций. После сокращения уравнений на ненулевые множители получается система уравнений относительно  $A, B, C$ :

$$\left\{ \begin{aligned} & A \left( -\lambda_m^2 - \frac{1-\mu}{2} n^2 + p n^2 \right) + B \left( \frac{1+\mu}{2} \lambda_m n + p \lambda_m n \right) + \\ & + C (-\mu \lambda_m - p \lambda_m) = 0; \\ & A \left( \frac{1+\mu}{2} \lambda_m n + p \lambda_m n \right) + \\ & + B \left( -\frac{1-\mu}{2} \lambda_m^2 - n^2 - \theta (1-\mu) \lambda_m^2 - \theta n^2 + p \frac{1}{2} \lambda_m^2 \right) + \\ & + C (n + \theta \lambda_m^2 n + \theta n^3) = 0; \\ & A (\mu \lambda_m) + B (-\theta n^3 - \theta (2-\mu) \lambda_m^2 n - n + p n) + \\ & + C \left( \theta \lambda_m^4 + 2 \theta \lambda_m^2 n^2 + \theta n^4 + 1 + p \cdot \left( -\frac{1}{2} \lambda_m^2 - n^2 \right) \right) = 0. \end{aligned} \right.$$

Таким образом, при потере устойчивости оболочкой может образоваться  $m$  полуволн синусоиды вдоль ее образующей и  $n$  полуволн по ее периметру. Необходимо отметить, что именно из этой системы уравнений путём принятия дополнительных упрощающих допущений и было получено большинство расчётных формул для определения давления  $p$ , а затем и критического давления  $P_{yc}$ .

В работах [2,4] было показано, что минимальное значение критического давления, определяемое из этой системы, достигается при  $m=1$ . Далее необходимо (без дополнительных упрощений) из системы алгебраических уравнений выразить величину давления. Очевидно, что эта величина зависит от целого  $n$ . Решение достаточно простой задачи минимизации приводит к искомому значению давления  $p$ . С учётом принятых обозначений определяется величина критического давления устойчивости:

$$P_{ycm} = \frac{p \cdot E \delta}{r (1-\mu^2)}.$$

**2. Точное решение**

Для удобства введём следующие обозначения для формирования матриц  $\Lambda = \{\alpha_{ij}\}$  и  $G = \{g_{ij}\}$ , которые образуют основную матрицу системы:

$$\begin{cases} \alpha_{11} = n^2, & \alpha_{12} = \lambda_m n, & \alpha_{13} = -\lambda_m, \\ \alpha_{21} = \lambda_m n; & \alpha_{22} = 0,5 \cdot \lambda_m^2, & \alpha_{23} = 0, \\ \alpha_{31} = 0, & \alpha_{32} = n, & \alpha_{33} = -(0,5 \cdot \lambda_m^2 + n^2). \end{cases}$$

$$\begin{cases} g_{11} = -\left(\lambda_m^2 + \frac{1-\mu}{2} n^2\right); & g_{12} = \frac{1+\mu}{2} \lambda_m n; & g_{13} = -\mu \lambda_m, \\ g_{21} = g_{12}; & g_{22} = -\left[\frac{1-\mu}{2} \lambda_m^2 + n^2 + \theta(1-\mu)\lambda_m^2 + n^2\right], \\ g_{23} = n\left[1 + \theta(\lambda_m^2 + n^2)\right], \\ g_{31} = -g_{13}; & g_{32} = -n\left[\theta(n^2 + (2-\mu)\lambda_m^2) + 1\right], \\ g_{33} = \theta(\lambda_m^2 + n^2)^2 + 1. \end{cases}$$

В принятых обозначениях алгебраическая система уравнений устойчивости преобразуется в матричное уравнение третьего порядка:

$$\begin{pmatrix} g_{11} + p \cdot \alpha_{11} & g_{12} + p \cdot \alpha_{12} & g_{13} + p \cdot \alpha_{13} \\ g_{21} + p \cdot \alpha_{21} & g_{22} + p \cdot \alpha_{22} & g_{23} + p \cdot \alpha_{23} \\ g_{31} + p \cdot \alpha_{31} & g_{32} + p \cdot \alpha_{32} & g_{33} + p \cdot \alpha_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = 0$$

Эта система имеет два решения: либо все коэффициенты  $A, B, C$  равны нулю, что соответствует отсутствию потери устойчивости (так как все дополнительные перемещения  $U, V, W$  тоже равны нулю), либо равен нулю определитель матрицы системы, т.е.  $\Delta = 0$ .

Раскрывая данный определитель и приравнявая его к нулю, получаем уравнение третьего порядка относительно параметра  $p$ . Для снижения порядка этого уравнения обычно пренебрегают величинами  $\alpha_{ij}$ , вводя новые соглашения и упрощения. В результате получается относительно простое уравнение первого порядка, из которого и находят приближительную формулу для расчёта критического давления устойчивости цилиндрической оболочки [2,5,6]. Однако можно, не пренебрегая величинами  $\alpha_{ij}$ , и используя свойства определителя суммы двух матриц, найти точное значение давления  $p$  из условия равенства нулю определителя системы. Из свойства определителя суммы двух матриц при расщеплении первого столбца следует, что:

$$\Delta = \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} + p\alpha_{12} & g_{13} + p\alpha_{13} \\ g_{21} & g_{22} + p\alpha_{22} & g_{23} + p\alpha_{23} \\ g_{31} & g_{32} + p\alpha_{32} & g_{33} + p\alpha_{33} \end{vmatrix} + p \cdot \begin{vmatrix} \alpha_{11} & g_{12} + p\alpha_{12} & g_{13} + p\alpha_{13} \\ \alpha_{21} & g_{22} + p\alpha_{22} & g_{23} + p\alpha_{23} \\ \alpha_{31} & g_{32} + p\alpha_{32} & g_{33} + p\alpha_{33} \end{vmatrix} = \Delta_1 + p \cdot \Delta_2 = 0.$$

Раскладываем первый определитель  $\Delta_1$ , расщепляя его второй столбец:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} + p\alpha_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} + p\alpha_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} + p\alpha_{23} \end{vmatrix} + p \cdot \begin{vmatrix} g_{11} & \alpha_{12} & g_{13} + p\alpha_{13} \\ g_{21} & \alpha_{22} & g_{23} + p\alpha_{23} \\ g_{31} & \alpha_{32} & g_{33} + p\alpha_{33} \end{vmatrix}.$$

Обозначим через  $|G|$  определитель матрицы  $G$ . Расщепляя в обоих определителях третьи столбцы, находим:

$$\Delta_1 = |G| + p \cdot \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} & \alpha_{13} \\ g_{21} & g_{22} & \alpha_{23} \\ g_{31} & g_{32} & \alpha_{23} \end{vmatrix} + p \cdot \left\{ \begin{vmatrix} g_{11} & \alpha_{12} & g_{13} \\ g_{21} & \alpha_{22} & g_{23} \\ g_{31} & \alpha_{32} & g_{33} \end{vmatrix} + p \cdot \begin{vmatrix} g_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ g_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ g_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix} \right\}.$$

В целях дальнейшего удобства будем обозначать через  $|G_k|$  - определитель, полученный из определителя  $|G|$  заменой  $k$ -го столбца на  $k$ -й столбец определителя матрицы  $\Lambda = \{\alpha_{ij}\}$ , а через  $|\Lambda_k|$  - определитель, полученный из определителя  $|\Lambda|$  заменой  $k$ -го столбца на  $k$ -й столбец определителя матрицы  $G$ . Тогда можно записать:

$$\Delta_1 = |G| + p \cdot |G_3| + p \cdot |G_2| + p^2 \cdot |\Lambda_1|.$$

Раскладывая второй определитель  $\Delta_2$ , находим:

$$\Delta_2 = |G_1| + p \cdot |\Lambda_2| + p \cdot \left\{ |\Lambda_3| + p \cdot |\Lambda| \right\} = |G_1| + p \cdot |\Lambda_2| + p \cdot |\Lambda_3| + p^2 \cdot |\Lambda|.$$

Подставив найденные выражения для определителей  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  в уравнение равенства нулю определителя системы, получаем уравнение третьего порядка относительно величины  $p$ :

$$\begin{aligned} p^3 + B_1 p^2 + B_2 p + B_3 &= 0; \\ B_1 &= \left\{ |\Lambda_1| + |\Lambda_2| + |\Lambda_3| \right\} / |\Lambda|; \\ B_2 &= \left\{ |G_1| + |G_2| + |G_3| \right\} / |\Lambda|; \\ B_3 &= |G| / |\Lambda|. \end{aligned}$$

Решение этого уравнения находится по формулам Кардано, которые определяют либо один действительный корень, либо два действительных корня. По смыслу критическое давление устойчивости должно быть наименьшим, поэтому во всех случаях выбирается только наименьший положительный действительный корень  $p(n)$ . Решение задачи минимизации величины  $p(n)$  осуществляется простым перебором для  $n=1,2,3,\dots,N$ , до первого значения  $N$ , для которого  $p(N) < p(N+1)$ , и не занимает много времени. Значение  $N$ , как правило, не превышает 10.

### 3. Обсуждение

Очевидно, что уравнение  $\Delta = \det(G + \Lambda) = 0$  связывает между собой главные параметры цилиндрической оболочки, такие как, её длина, срединный радиус, толщина и величина критического давления, при которой оболочка подвергается деформации, приводящей к её разрушению.

Следовательно, возможно решать задачи оптимизации одного параметра при фиксированных значениях других.

Например, задача определения длины оболочки при условии задания остальных величин приводит к необходимости решения алгебраического уравнения четвёртой степени:

$$\chi^4 + a_3\chi^3 + a_2\chi^2 + a_1\chi + a_0 = 0.$$

Это уравнение решается методом Феррари.

Более того, можно выполнить оптимизацию коэффициентов  $\sigma, E, \mu, \rho$  с целью создания идеального материала цилиндрической оболочки

при всех остальных заданных параметрах. Конечно, такие задачи потребуют обширных вычислительных экспериментов.

### Заключение

Разработанный метод точного расчёта критического давления по устойчивости цилиндрической оболочки, был реализован в алгоритмической функции  $ECR(P, r, \delta, E, \mu)$ . Сам метод является адекватным существующим практическим формулам, и обеспечивает повышенную точность вычислений от 5 до 25% для различных расчётных глубин. Точность расчётов повышается с увеличением расчётной глубины.

Функция  $ECR(P, r, \delta, E, \mu)$  не требует каких-то ограничений, и является универсальной, так как она применима для расчёта всех параметров цилиндрических оболочек по критическому давлению по устойчивости прочных корпусов торпед, контейнеров и других глубоководных подводных аппаратов.

### Литература

1. Илларионов Г. Ю., Карпачев А. А. К вопросу о расчете оболочек вращения произвольной формы переменной толщины //12 Дальневосточная научно-техн. конф.: Тез. докл. – Владивосток: ДВГТУ, Прим. кр. Правление НТОС им. ак. А. Н. Крылова, 1995. – С. 93-97.
2. Новожилов В. В. Теория тонких оболочек.– Л.: Судпромгиз, 1951. – 344 с.
3. Подводные роботы и их системы: Сб. статей /Под ред. академика Агеева М. Д. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 109 с.
4. Соломенко Н. С., Румянцев Ю. Н. Строительная механика подводных лодок. – Л., ВВМИОЛУ им. Ф. Э. Дзержинского, 1962. – 400 с.
5. Пикуль В.В. Механика оболочек. – Владивосток: Дальнаука, 2009. – 536 с.
6. Пикуль В.В. К теории устойчивости оболочек // ДАН, 2007. – Т. 416. - № 3. – С. 341.

### References

1. Illarionov G. YU., Karpachev A. A. K voprosu o raschete obolochek vrashcheniya proizvol'noj formy peremennoj tolshchiny //12 Dal'nevostochnaya nauchno-tekhn. konf.: Tez. dokl. – Vladivostok: DVG TU, Prim. kr. Pravlenie NTOS im. ak. A. N. Krylova, 1995. – S. 93-97.
2. Novozhilov V. V. Teoriya tonkih obolochek.– L.: Sudpromgiz, 1951. – 344 s.
3. Podvodnye roboty i ih sistemy: Sb. statej /Pod red. akademika Ageeva M. D. – Vladivostok: Dal'nauka, 1995. – 109 s.
4. Solomenko N. S., Rumyancev YU. N. Stroitel'naya mekhanika podvodnyh lodok. – L., VVMIOLU im. F. E. Dzerzhinskogo, 1962. – 400 s.
5. Pikul' V.V. Mekhanika obolochek. – Vladivostok: Dal'nauka, 2009. – 536 s.
6. Pikul' V.V. K teorii ustojchivosti obolochek // DAN, 2007. – T. 416. - № 3. – S. 341 – 343.

УДК 623.98: 534.222

## СИСТЕМА РАСЧЕТА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

**Анна Михайловна Василенко**

кандидат технических наук

научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории  
Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова  
690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6  
e-mail: kahunya@gmail.com

**Наталья Владиславовна Пятакович**

младший научный сотрудник отдела организации научной работы  
Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова  
690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6  
e-mail: pva.natali@yandex.ru

**Александр Петрович Пурденко**

кандидат технических наук, доцент  
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: app.59@mail.ru

**Алина Валерьевна Филиппова**

конструктор-технолог АО «Союз-Ремонт»  
690922, Россия, Приморский край, о. Русский.  
e-mail: alina.filippova2013@yandex.ru

**Евгений Геннадьевич Филиппов**

старший преподаватель кафедры Электроэнергетики и электротехники  
Дальневосточный федеральный университет  
690922, Россия, Приморский край, о. Русский.  
e-mail: alina.filippova2013@yandex.ru

### Аннотация

В статье приводятся результаты очередного этапа научных исследований авторов по вопросу создания системы мониторинга морских акваторий на основе разработок нелинейной просветной гидроакустики и нейросетевых технологий распознавания образов объектов. Рассматривается структура, аналитические свойства и функциональные возможности информационно-аналитической системы расчета пространственной структуры и параметров гидроакустического поля на протяженных трассах с переменными характеристиками среды и ее границ. Проведена оценка достоверности результатов программы расчета характеристик морской среды, как основного элемента структуры информационно-аналитической системы. Получены результаты расчетов характеристик морской среды при прохождении циклонического вихря. На примере района юго-восточной части п-ова Камчатка, проиллюстрирован алгоритм выбора потенциально места установки глубоководной приемной системы. Смоделированы условия распространения звука на дистанциях 500 км, показано влияние сложного рельефа дна и различных глубин расположения источника звука на условия приема гидроакустических сигналов.

**Ключевые слова:** информационно-аналитическая система, лучевая картина, потери при распространении звука, вихрь, просветная система мониторинга, обработка сигналов, эхосигналы объектов, метод активной корреляции

## SYSTEM FOR CALCULATION OF THE SPATIAL STRUCTURE AND PARAMETERS OF A HYDROACOUSTIC FIELD

**Anna M. Vasilenko**

Researcher of a Research laboratory  
Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov  
Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia  
e-mail: kahunya@gmail.com

**Natalia V. Pyatakovich**

Junior Researcher, Department of Organization of Scientific Work  
Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov  
Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia  
e-mail: pva.natali@yandex.ru

**Alexander P. Purdenko**

Associate Professor, Cand. Sci. Tech.  
Associate professor of department of Tactics of the Navy and military history  
Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov  
Kamskij lane, 6, Vladivostok, 690062, Russia

e-mail: app.59@mail.ru

**Alina V. Filippova**

Constructor–technologist Joint-Stock Company «Souz-Remont»

690922, Vladivostok, Russia

e-mail: alina.filippova2013@yandex.ru

**Evgenii G. Filippov**

Senior Lecturer, Department of Electrical Power Engineering

and Electrical Engineering, Far Eastern Federal University

Russian island 690922, Primorsky Krai, Russia

e-mail: alina.filippova2013@yandex.ru

### Abstract

The article presents the results of the next phase of the authors' scientific research on the creation of a monitoring system for marine areas based on the development of non-linear low-frequency hydroacoustics and neural network technologies for recognizing object images. Discussed is the structure, analytical properties and functionality of the analytical information system (AIS) for calculating the structure and parameters of the hydroacoustic field for long-range distances with variable characteristics of the medium and its boundaries. Estimated is the accuracy of the results of a program for calculating the characteristics of a sea medium (the DALNOST program). Investigated are the parameters and structure of the hydroacoustic field, which were calculated from the in-situ measurements of the sound speed inside a vortex disturbance zone that was observed in the western part of the Sea of Japan. The obtained results indicate the practical importance of technique and the DALNOST program as a key element of the AIS structure and provide the possibility for its integration into the systems created for the monitoring of marine water fields to solve the research problems as well as the problems of developing the ocean environment in the interests of the marine science. The sound propagation conditions for distances of 500 km are simulated, the impact of a complex bottom relief and various depths of the sound source on the sonoacoustic signal receiving conditions is shown.

**Key words:** information-analytical system, beam pattern, sound propagation loss, vortex, low-frequency monitoring system, signal processing, echo-signals of objects, active correlation method

### Введение

Состав и эффективная работа создаваемой Дальневосточной системы мониторинга полей морских акваторий требуют обоснованного выбора мест установки ее элементов и последующего накопления данных об условиях распространения акустических сигналов по контролируемым трассам [1–4]. Эти причины обусловили необходимость разработки информационно-аналитической системы (ИАС) в структуре систем морского мониторинга [7, 11–21.], обеспечивающей расчет структуры и параметров гидроакустического поля на трассах морских акваторий

#### 1. Расчет пространственной структуры и параметров гидроакустического поля на протяженных трассах с переменными характеристиками среды и ее границ

Структура информационной аналитической системы (ИАС) определяется ее функциональным назначением. Методом вычислительного эксперимента ИАС должна обеспечивать оценку параметров гидроакустического поля (ПГАП) заданного района, работая как с данными натурных измерений, так и осуществляя автоматизированную выборку данных из баз, основанных на обобщении многолетней гидрологической информации [1, 5, 8]. В качестве анализируемых параметров могут быть рассмотрены аномалия распространения, потери на распространение, оптимальный угол наклона характеристики направленности антенны.

Структура ИАС включает в себя:

– базы данных многолетних наблюдений за наиболее значимыми параметрами канала распространения звука (поле скорости звука,

рельеф дна, статистические данные о грунте, льде и поверхностном волнении);

– базы данных с характеристиками используемых технических средств и параметрами целей;

– методики для реализации моделей данных о характеристиках канала распространения акустических волн и закономерностей формирования звукового поля;

– динамические библиотеки, обеспечивающие автоматизированную подготовку исходных данных из баз данных;

– программно-математическое обеспечение для расчета ПГАП и статистического анализа результатов расчетов.

Аналитические свойства системы связаны с формированием статистических описаний анализируемых параметров в виде их стандартизованных функций, позволяющих наиболее полно оценить поведение параметра в заданной пространственно-временной области, дать вероятностную оценку не только дальности действия гидроакустической станции (ГАС), но и площади зоны освещения подводной обстановки.

Основным элементом структуры ИАС является методика расчета и анализа количественных оценок гидролого-акустической обстановки (ГАО). Постоянное увеличение объема измеренных данных о состоянии морской среды определяет возрастающие требования к прогнозу ГАО.

Например, обеспечение оценки ПГАП для фронтальных, вихревых зон и районов со сложным рельефом дна. Для решения задачи была разработана методика и программа расчета ПГАП «Дальность» [6].

Одной из отличительных особенностей от ранее разработанных методик является то, что



горизонтальные неоднородности поля скорости звука представляются по дистанции набором элементарных одномерно-слоистых задач, что обеспечивает более устойчивую и быструю по

времени работу программного продукта в сложных гидрологических условиях.

Пример лучевой картины, рассчитанный по программе «Дальность» для мелководного участка приведен на рис. 1.

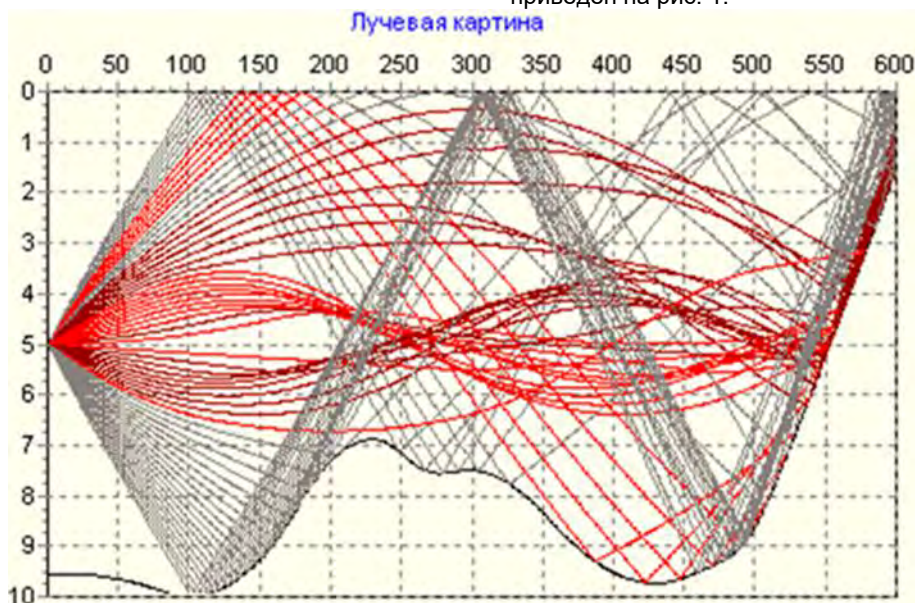


Рис. 1. Расчет траекторий лучей, проходящих мелководный участок

На время работы программного модуля расчета параметров гидроакустического поля, оказывает влияние не только быстродействие компьютера, но и вычислительный процесс, обусловленный алгоритмом решения задачи. Задача моделирования распространения звука в океане из-за ветвления вычислительного процесса алгоритмически сложная.

Построение лучевых картин состоит из большого числа условных операторов (проверок на прохождения траектории луча через слой, на отражение от поверхности или дна моря, на условие полного внутреннего отражения, на применимость лучевой теории и т.д.) в результате которых выполняется необходимое действие программы.

Так же на время работы программы влияет и количество исходных данных. Если стремиться к более полному описанию структуры поля скорости звука и принимать в качестве исходных данных профили вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) с несколькими тысячами горизонтов, то время выполнения программы увеличится, за счет значительного увеличения числа проверок и вычислительных операций на границе каждого слоя.

Например, вариант расчета ПГАП для профиля ВРСЗ с 3077-ю горизонтами считался 562 с, в 187 раз дольше, чем вариант для профиля ВРСЗ с 34-

мя горизонтами (стандартные горизонты и характерные точки профиля) – 3 с, а разность потерь при распространении звука не превышала 4 дБ для 75% значений.

Следовательно, расчеты структуры гидроакустического поля целесообразнее проводить для обоснованного количества профилей ВРСЗ по трассе и числа горизонтов в них, обеспечивающих заданную точность при решении задачи.

Основным критерием применимости методики 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 [7]. 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.

Вычислив на каждом шаге трассы разность между натурно измеренными и расчетными потерями при распространении звука построим гистограмму и кумуляту. На рис. 2 гистограмма и кумулята иллюстрируют, что 68% данных входит в интервал от 0 до 4 дБ.

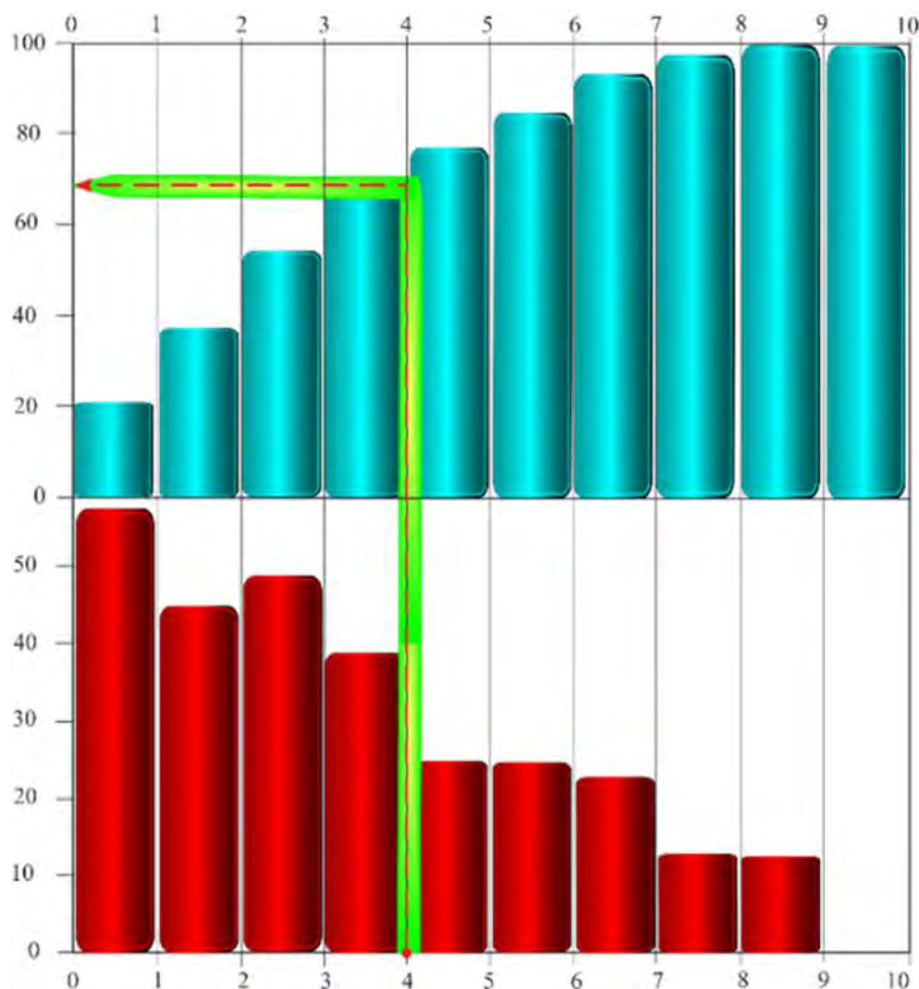


Рис. 2. Оценка меры различия расчетных и натуральных данных о потерях при распространении звука. Частота – 108 Гц, глубина источника – 50 м, глубина приемника – 520 м

Это позволяет сделать вывод, что результаты программы «Дальность» хорошо согласуются с натурными измерениями потерь на распространение звука.

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

программам «Горизонт» и «FIELD» показало их хорошее согласование. (94% данных входят в интервал от 0 до 4 дБ).

Таким образом, оценки достоверности результатов программы «Дальность» позволяют сделать вывод о том, что лучевая теория, положенная в основу численного моделирования условий распространения акустических сигналов, дает результаты, удовлетворяющие практическим запросам. Практической значимостью исследований являются расчеты параметров гидроакустического поля, проведенные по натурным измерениям скорости звука вихревого возмущения, наблюдавшегося в западной части Японского моря [8–10].

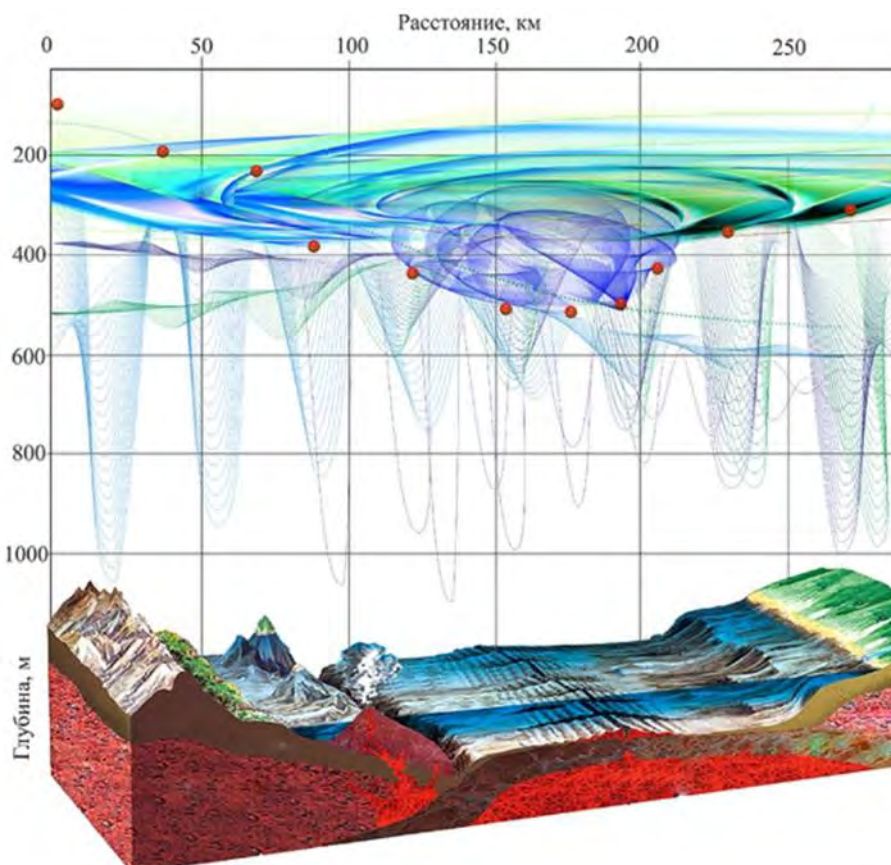


Рис. 3. Фрагмент лучевой картины при переходе траекторий лучей через вихревую зону (ось подводного звукового канала отмечена точками)

Его образование обусловлено взаимодействием водных масс холодного Приморского и теплого Северокорейского течений. Через вихревую область выполнялись гидрологические разрезы, а данные о температуре и солёности фиксировались на горизонтах через 10 м от поверхности до дна.

Фрагмент лучевой картины при переходе траекторий лучей через вихревую зону представлен на рис. 3.

При построении лучевой картины по натурным данным контролировалось изменение горизонтальных и вертикальных градиентов скорости звука.

Из дальнейшего расчета параметров гидроакустического поля было исключено до 7% лучей, не удовлетворяющих условию малого изменения градиентов скорости звука на длине волны.

На рис. 4 представлены результаты расчета потерь при распространении звуковой энергии при вторжении вихря. Изолинии равных потерь на распространение иллюстрируют влияние вихревой линзы.

Из рис. 4 видно, что прием сигнала на глубине 100 м существенно затруднен, поскольку после прохождения ядра вихря, звуковая энергия более резко переходит в глубокие слои от 400 до 600 м, чем в зоне фронта.

Разность матриц потерь на распространение (с вихрем и без него) дает увеличение потерь на распространение на 6–12 дБ в области вихревой линзы относительно точек с теми же координатами во фронтальной зоне.

Отметим, что ограничения лучевой теории может сказаться в приповерхностном слое глубиной до 50 м со стороны холодного Приморского течения, где значения вертикального градиента скорости звука не превышают  $0,06 \text{ с}^{-1}$ .

Максимальное значение горизонтального градиента составляет не более  $0,00002 \text{ с}^{-1}$  и наблюдается на северной периферии вихря со стороны холодного течения.

Максимальные значения фактора фокусировки (отношение интенсивности звука в сечении лучевой трубки на определенном расстоянии в рефракгирующей среде к интенсивности от того же источника на том же расстоянии в бесконечной однородной среде), составляющие 250–450 единиц, наблюдаются перед «воронкой», где изолинии скорости звука имеют почти вертикальный характер, т.е. в зоне максимальных горизонтальных градиентов скорости звука.

Увеличение значений фактора фокусировки от 100 до 225 единиц объясняется пересечением лучей, попавших в подводный звуковой канал с группой энергонесущих водных лучей, претерпевших полное внутреннее отражение вблизи дна.

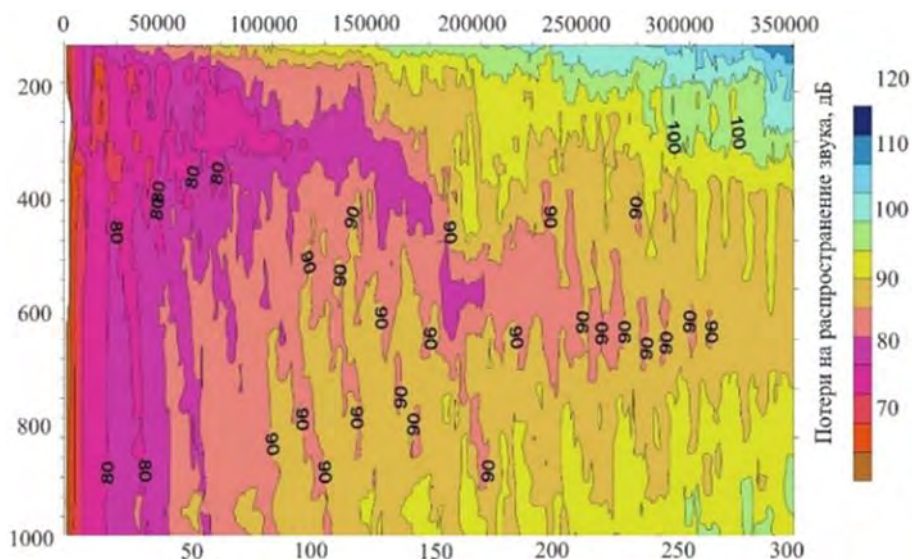


Рис. 4. Потери на распространение звука в вихревой области. Частота – 1 кГц, глубина источника – 50 м

Статистический анализ данных показывает, что из выборки в 3021 значения величины фактора фокусировки не превышают 32 единиц с обеспеченностью 75%, медианное значение фактора фокусировки равно 11,89 единиц.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что методика применима для оценки эффективности гидроакустических средств, в том числе и в сложных гидрологических условиях.

Результаты свидетельствуют о практической значимости методики и программы «Дальность», как основного элемента структуры информационно-аналитической системы, и обеспечивают возможность ее внедрения в создаваемые системы мониторинга полей морских акваторий для решения задач исследования и освоения океанской среды в интересах морской науки и народно-хозяйственного комплексов.

Информационно-аналитическая система, обеспечивающая расчет структуры и параметров гидроакустического поля на трассах морских акваторий, может быть применена:

- в научно-исследовательских и научно-производственных организациях при конструировании и проведении испытаний новых образцов гидроакустических средств, адаптируемых к конкретному району;
- в учебном процессе при подготовке курсантов военно-морских институтов или специалистов в области гидроакустики;
- в качестве инструмента исследователя, позволяющего совершенствовать методы прогноза параметров гидроакустического поля, изучать особенности гидролого-акустической обстановки районов Мирового океана;
- для оценки оптимальной конфигурации пространственно-развитой гидроакустической системы и определения горизонтов расположения излучающих и приемных блоков гидроакустических систем мониторинга полей на протяженных морских трассах с переменными характеристиками среды и ее границ.

Направлением функционального развития информационно-аналитической системы является разработка модуля, реализующего кригинг-

интерполяцию, обладающую наилучшими корреляционными связями между измеренными и модельными значениями анализируемых параметров, что дает возможность дальнейшего их сопряжения с картами районов.

## 2. Выбор места установки глубоководной приемной системы

Проиллюстрируем решение задачи выбора места установки глубоководной приемной системы с прогнозом условий распространения звука в целях оценки необходимого энергетического потенциала при конструировании нового гидроакустического средства, адаптируемого к конкретному региону. Исходной точкой в работе будет являться анализ рельефа дна в районе юго-восточной части п-ова Камчатка, чтобы обозначить возможные места установки глубоководной приемной системы.

Для построения фрагмента поверхности рельефа дна из базы данных для северо-западной части Тихого океана были выбраны значения глубин места в секторе с вершиной в точке, расположенной вблизи береговой линии Авачинского залива. Наиболее примечательными элементами рельефа дна являются глубоководный Курило-Камчатский желоб и возвышенность Обручева.

Анализ глубин места в заданном секторе показал, что шельфовая зона имеет ширину до 12 км, в интервале глубин 50–200 м уклон дна возрастает до 1,7°. В пределах участка материкового склона 200–3000 м выделяются возвышенности и впадины с резко меняющейся глубиной.

На горизонтах более 3000 м материковый склон крутыми уступами переходит в Курило-Камчатский желоб с глубинами, превышающими 6,5 км для большинства направлений. Дно северной части Авачинского залива сложено неконсолированными отложениями.

Структура неконсолированных отложений на шельфе свидетельствует о том, что их формирование было обусловлено интенсивным сносом обломочного материала с побережья,

обрамляющего залив, в том числе и с Шипунского п-ова [2–4, 9].

Выбор места установки определяется приемлемым удалением изделия от береговой линии, соответствующей этому расстоянию глубиной места, размером и наклоном площадки,

на которой предполагается расположить приемную систему.

На рис. 5 приведен фрагмент рельефа дна Авачинского залива с направлениями расчета потерь на распространение звука.

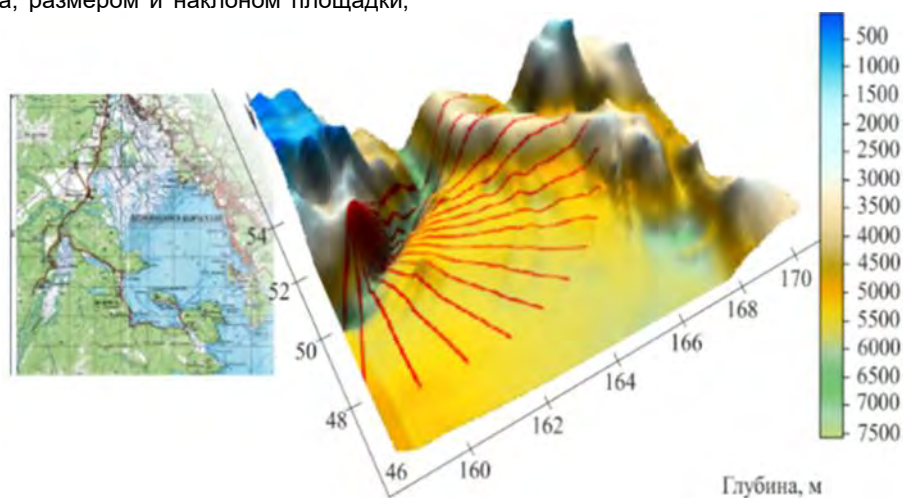


Рис. 5. Фрагмент рельефа дна Авачинского залива и направления расчета потерь на распространение звук

По графикам рельефа дна для соседних направлений выделяются участки, отвечающие заданным условиям к месту установки приемной системы. Затем в центре каждого участка вычисляется средняя глубина.

Полученное значение глубины места в центральной точке сопоставляется со значением, выбранным для ее географических координат из базы данных. Сравнение вычисленного среднего и базового значений дает возможность судить о поднятии рельефа дна в центре участка.

Из группы точек для последующего моделирования условий распространения сигналов выбираются те, которые принадлежат более ровным участкам. Анализ условий распространения звука проведен с помощью программного модуля информационно-аналитической системы расчета потерь на распространение звука в двумерно-неоднородном волноводе [6], основанного на лучевом приближении решения волнового уравнения и обеспеченного для заданного района данными о состоянии поверхности моря, вертикальному распределению скорости звука, рельефу дна.

Качество моделирования условий распространения звука ограничивается отсутствием необходимой информации о параметрах донного грунта в Авачинском заливе, для оценок использовались усредненные данные для северной части Тихого океана [10, 16].

В рамках статьи кратко представлены результаты расчета потерь на распространение

звука только для одного месяца – января, предельной дистанции расчета 500 км, глубин погружения источника 10 м и 150 м, глубины приемника 2720 м, частоты 150 Гц, профилей рельефа дна.

Из представленных результатов можно выделить следующие группы: крайние трассы в 42°, 192° и 202° с линиями рельефа дна, наиболее полого относительно других направлений, переходящих уступами в материковый склон на дальних дистанциях; трассы 52°–92° с подъемом линий рельефа дна на дистанциях близких к излучателю и провалом с глубинами до 7600 м, переходящим на дальних дистанциях расчета в материковый склон; трассы 102°–152° без подъема линий рельефа дна на дистанциях близких к излучателю и более узкими поперечными сечениями желоба с глубинами до 7800 м, наиболее круто переходящего в материковый склон; трассы 162°–192° без подъема линий рельефа дна на дистанциях близких к излучателю, с глубинами желоба до 7000 м, переходящего уступами в материковый склон (рис. 6).

Полученная для рассматриваемых условий лучевая картина, представленная на рис. 7, характерна для зимнего периода, когда горизонтальное распространение звука сопровождается многократным отражением от поверхности воды.

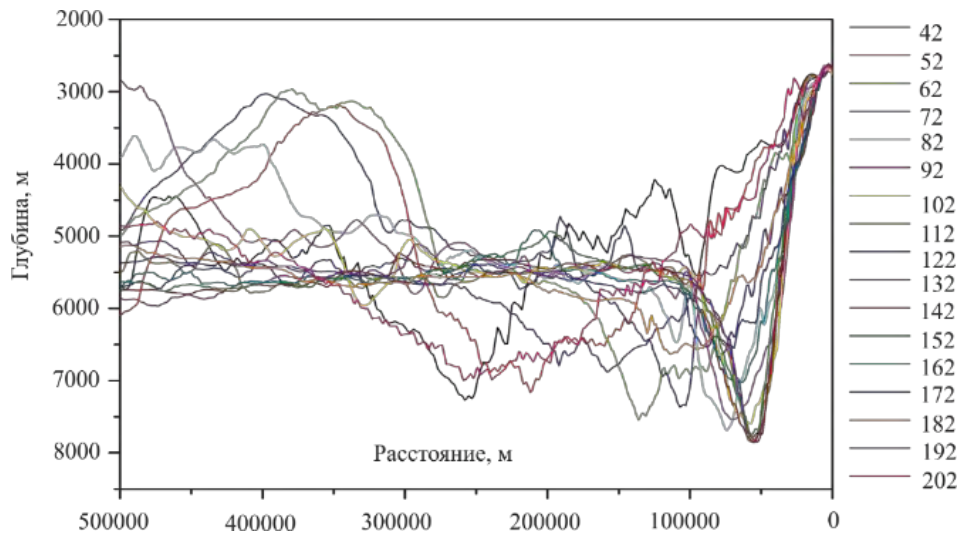


Рис. 6. Профили рельефа дна по направлениям расчета, сходящимся на расстоянии 500 км в точке предполагаемой установки приемной системы

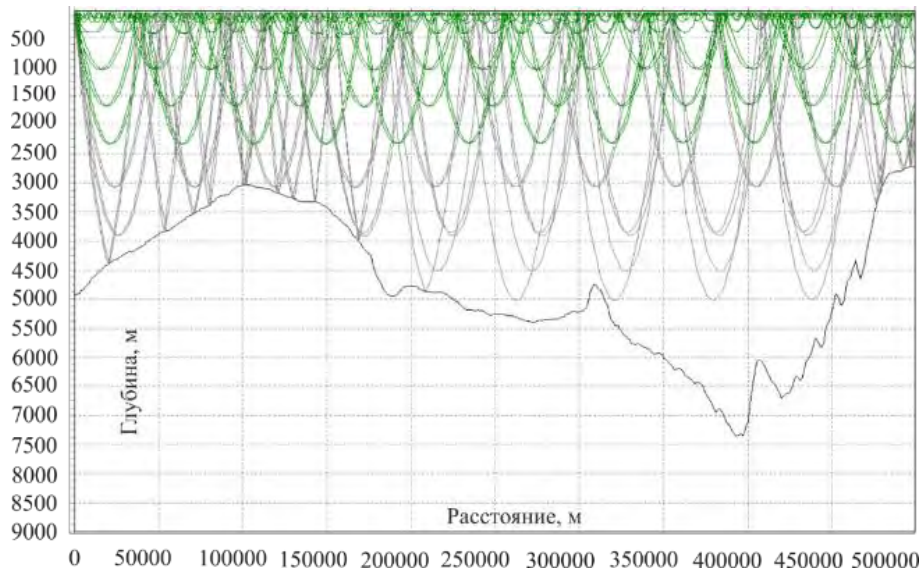


Рис. 7. Лучевая картина, рассчитанная для января по направлению в  $72^\circ$ , глубина источника 150 м

Известно, что за счет положительной рефракции звуковых лучей рельеф дна не должен оказывать существенного влияния на формирование звукового поля. Однако с погружением источника звука у лучей, отражающихся от поверхности моря, точки полного внутреннего отражения проникают до более глубоких горизонтов толщи воды.

Ввиду того, что часть трасс на ближних дистанциях имеет возвышенности, а на дальних дистанциях все трассы проходят по материковому склону, то с погружением источника увеличивается количество лучей, претерпевающих на соответствующих дистанциях отражение от дна, что влечет значительное увеличение потерь на распространение звука. Из графиков потерь на

распространение звука, представленных на рис. 8, рассчитанных по заданным направлениям, видно, что погружение источника звука в январе до 150 м ухудшает условия приема сигналов, за счет сложного рельефа дна в районе установки глубоководной приемной системы, что в свою очередь, сказывается на прогнозируемых величинах дальности действия гидроакустического средства.

Оценивая потери на распространения звука для группы центральных точек, оптимальным местом установки приемной системы будем считать тот участок, где гидроакустическое средство имеет наибольшие значения дальности действия для направлений по всем месяцам.

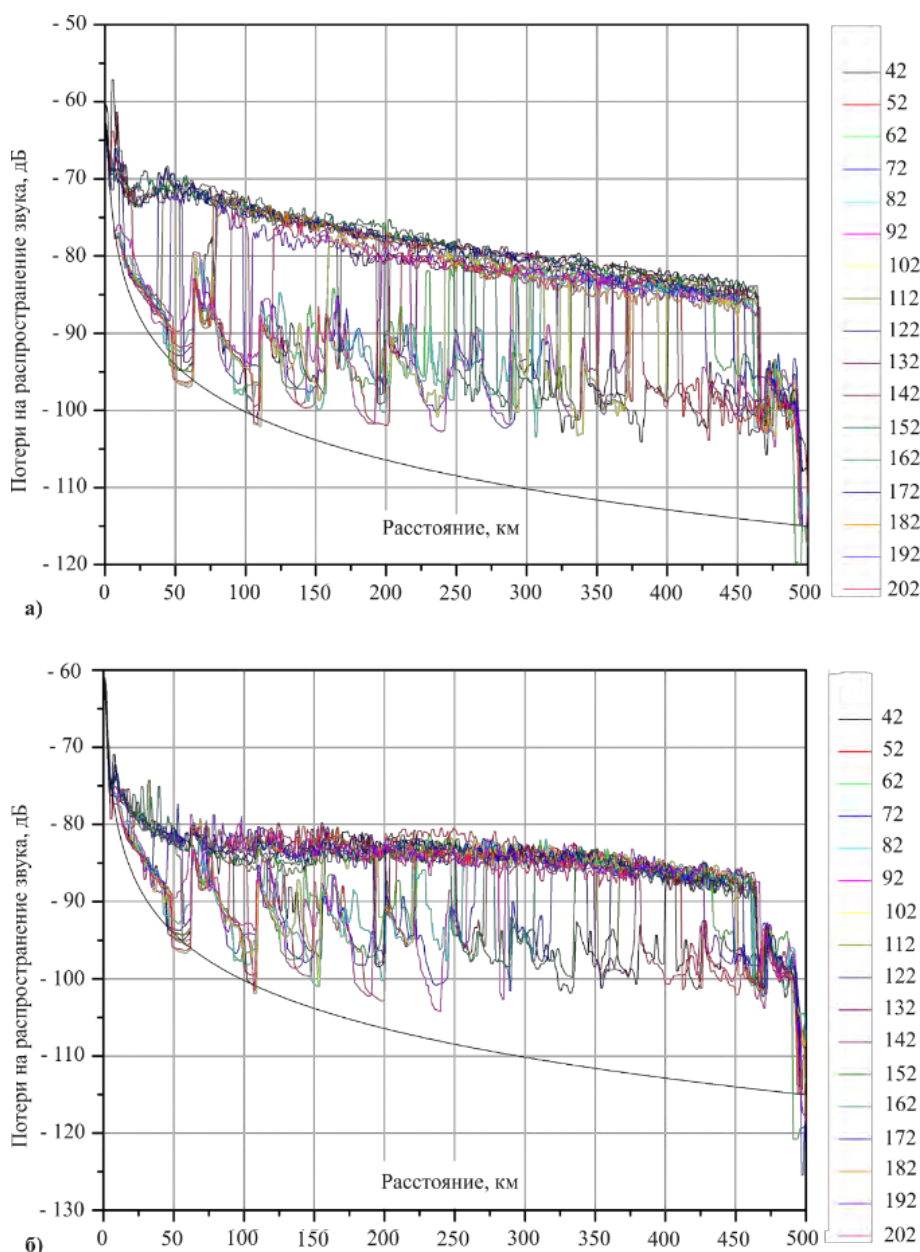


Рис. 8. Потери на распространение звука для заданных направлений в январе, частоты излучения 150 Гц, глубины приемника 2720 м, глубины излучения 10 м (а), 150 м (б)

На примере района юго-восточной части п-ова Камчатка, проиллюстрирован алгоритм выбора потенциально места установки глубоководной приемной системы. Смоделированы условия распространения звука в январе, показано влияние сложного рельефа дна и различных глубин расположения цели на условия приема гидроакустических сигналов.

### Заключение

Накопленные информационные ресурсы о состоянии поля скорости звука и рельефе дна, а также опыт разработки программных модулей, реализующих автоматизированную подготовку данных и расчет потерь на распространение звука, позволили более эффективно и качественно решать задачу прогноза условий распространения звуковой энергии в морской среде. Автоматизация трудоемкого начального этапа – подготовка

исходных данных, дала возможность производить массовые расчеты для статистических оценок таких величин, как потери при распространении звука, оптимальный угол наклона характеристики направленности антенны и др. Статистические описания анализируемых параметров в виде их стандартизованных функций, позволяют наиболее полно оценить поведение параметра в заданной пространственно-временной области, дать вероятностную оценку не только дальности действия гидроакустических средств, но и площади зоны освещения подводной обстановки. Программные модули, обеспечивающие расчет параметров звукового поля в сложных гидрологических условиях, позволяют проводить более детальный анализ, за счет сохранения в текстовом и графических видах, обширных данных по направлениям расчета – географических координат точек расчета, особенностей рельефа

дна, изменения поля скорости звука, лучевых картин, изменение потерь на распространение звука от расстояния или географических координат.

### Литература

1. 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.
2. Vasilenko A.M., Mironenko M.V., Vasilenko K.K., Statsenko L.G., Pyatakovich V.A. Analytical information system for calculating sea medium characteristics. POMA 24, 070017(2016), <http://DX.DOI.ORG/10.1121/2.0000155>.
3. Патент № 2681242 РФ Интеллектуальная система обнаружения и классификации морских целей: / Пятакович В.А. Оpubл. 05.03.19.
4. Патент № 2681252 РФ Система обнаружения гидроакустических сигналов и их нейросетевой классификации: / Пятакович В.А., Василенко А.М. Оpubл. 05.03.19.
5. 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.
6. А.с. № 2003611941 РФ. Программа расчета и анализа параметров гидроакустического поля «Дальность»: /Василенко А.М., Малиновский В.Э., Алюшин Д.А.
7. Пятакович В.А., Василенко А.М., Пашкеев С.В. Комплексный многоуровневый мониторинг морской среды с использованием нейросетевых технологий / Двойные технологии. – М.: 2018. № 3 (84). – С. 62–66.
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.
9. Ломтев В. Л. О некоторых формах рельефа Тихоокеанской континентальной окраины Камчатки. Рельеф и структура осадочного чехла акваториальной части Дальнего Востока. – Владивосток. – 1981. С. 64–69.
10. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. – М.: Мир, 1980. – 584 с.
11. Василенко А.М., Пятакович В.А. Аналитические свойства и функциональные возможности системы расчета пространственной структуры и параметров гидроакустического поля / Подводные исследования и робототехника. – Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2017. № 2 (24). – С. 60–67.
12. Пятакович В.А. Гарантированное управление надежностью интеллектуальной системы классификации морских целей в условиях неопределенности / Двойные технологии. – М.: 2018. № 4 (85). С. 99–103.
13. Пятакович В.А., Василенко А.М., Пашкеев С.В. Автоматизированная система мониторинга морской среды для решения задач обнаружения технического объекта / Двойные технологии. – М.: 2018. № 4 (85). – С. 85–88.
14. Пятакович В.А., Василенко А.М. Методы расчетной и экспериментальной оценки первичного гидроакустического поля морской цели / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 4. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. – С. 41–55.
15. Пятакович В.А., Василенко А.М. Расчет показателей эффективности распознавания морских целей с аппроксимацией характеристик обнаружения для интеллектуальных систем ВМФ / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. – С. 446–455.
16. 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.
17. Василенко А.М., Пятакович В.А., 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.
18. Пятакович В.А., Василенко А.М., Мироненко М.В. Обучение нейронной сети как этап разработки экспертной системы для классификации источников физических полей при мониторинге акваторий // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2017. № 3(32). С. 138–149.
19. Пятакович В.А. Система классификации морских целей на базе нейросетевых технологий // Морские интеллектуальные технологии. – СПб.: 2018. № 4 (42) Том 5. С. 169–176.
20. Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Пятакович В.А., Василенко А.М. Реализация в системе мониторинга операций распознавания и классификации морских целей // Датчики и системы – М.: 2019. – № 1(232). – С. 14–17.
21. Пятакович В.А., Рычкова В.Ф. Параметрическая оптимизация нейросетевой системы классификации морских целей по критерию надежности // Морские интеллектуальные технологии. – СПб.: 2018. № 4 (42) Том 5. С. 153–162.

### References

1. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Khotinskiy O.V. Raspoznavanie i klassifikatsiya istochnikov formirovaniya poley razlichnoy fizicheskoy prirody v morskoy srede: monografiya. – Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2017. – 255 s.
2. Vasilenko A.M., Mironenko M.V., Vasilenko K.K., Statsenko L.G., Pyatakovich V.A. Analytical information system for calculating sea medium characteristics. POMA 24, 070017(2016), <http://DX.DOI.ORG/10.1121/2.0000155>.
3. Patent № 2681242 RF Intellektual'naya sistema obnaruzheniya i klassifikatsii morskikh tseley: / Pyatakovich V.A. Opubl. 05.03.19.
4. Patent № 2681252 RF Sistema obnaruzheniya gidroakusticheskikh signalov i ikh neyrosetevoy klassifikatsii: / Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M. Opubl. 05.03.19.



5. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Khotinskiy O.V. Neyrosetevye tekhnologii v intellektual'nykh sistemakh obnaruzheniya i operativnoy identifikatsii morskikh tseley: Monografiya. – Vladivostok: Morskoy gos. un-t im. G. I. Nevel'skogo, 2018. – 263 s.
6. A.s. № 2003611941 RF. Programma rascheta i analiza parametrov gidroakusticheskogo polya «Dal'nost'»: /Vasilenko A.M., Malinovskiy V.E., Alyushin D.A.
7. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Pashkeev S.V. Kompleksnyy mnogourovnevnyy monitoring morskoy sredy s ispol'zovaniem neyrosetevykh tekhnologiy / Dvoynye tekhnologii. – M.: 2018. № 3 (84). – S. 62–66.
8. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M. Rychkova V.F. Sposob klassifikatsii podvodnykh tekhnicheskikh ob'ektov ekspertnoy intellektual'noy sistemoy s priemnoy parametricheskoy antennoy / Morskie intellektual'nye tekhnologii. – SPb.: 2018. № 2 (40) Tom 2. S. 121–126.
9. Lomtev V. L. O nekotorykh formakh rel'efa Tikhookeanskoj kontinental'noy okrainy Kamchatki. Rel'ef i struktura osadochnogo chekhla akvatorial'noy chasti Dal'nego Vostoka. – Vladivostok. – 1981. S. 64–69.
10. Kley K., Medvin G. Akusticheskaya okeanografiya. – M.: Mir, 1980. – 584 s.
11. Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A. Analiticheskie svoystva i funktsional'nye vozmozhnosti sistemy rascheta prostranstvennoy struktury i parametrov gidroakusticheskogo polya / Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. – Vladivostok: IPMT DVO RAN, 2017. № 2 (24). – S. 60–67.
12. Pyatakovich V.A. Garantirovannoe upravlenie nadezhnost'yu intellektual'noy sistemy klassifikatsii morskikh tseley v usloviyakh neopredelennosti / Dvoynye tekhnologii. – M.: 2018. № 4 (85). S. 99–103.
13. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Pashkeev S.V. Avtomatizirovannaya sistema monitoringa morskoy sredy dlya resheniya zadach obnaruzheniya tekhnicheskogo ob'ekta / Dvoynye tekhnologii. – M.: 2018. № 4 (85). – S. 85–88.
14. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M. Metody raschetnoy i eksperimental'noy otsenki pervichnogo gidroakusticheskogo polya morskoy tseli / Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. Vyp. 4. Tula: Izd-vo TulGU, 2018. – S. 41–55.
15. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M. Raschet pokazateley effektivnosti raspoznavaniya morskikh tseley s approksimatsiyey kharakteristik obnaruzheniya dlya intellektual'nykh sistem VMF / Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. Vyp. 2. Tula: Izd-vo TulGU, 2018. – S. 446–455.
16. Pyatakovich V.A. Garantirovannoe upravlenie nadezhnost'yu intellektual'noy sistemy klassifikatsii morskikh tseley v usloviyakh neopredelennosti / Dvoynye tekhnologii. – M.: 2018. № 4 (85). S. 99–103.
17. Vasilenko A.M., Pyatakovich V.A., Rychkova V.F. Sposob klassifikatsii podvodnykh tekhnicheskikh ob'ektov ekspertnoy intellektual'noy sistemoy s priemnoy parametricheskoy antennoy // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – SPb.: 2018. № 2 (40). tom 2. – S. 121–126.
18. Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M., Mironenko M.V. Obuchenie neyronnoy seti kak etap razrabotki ekspertnoy sistemy dlya klassifikatsii istochnikov fizicheskikh poley pri monitoringe akvatoriy // Vestnik In-zhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. – Vladivostok: Dal'nevost. federal. un-t, 2017. № 3(32). S. 138–149.
19. Pyatakovich V.A. Sistema klassifikatsii morskikh tseley na baze neyrosetevykh tekhnologiy // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – SPb.: 2018. № 4 (42) Tom 5. S. 169–176.
20. Mironenko M.V., Malashenko A.E., Pyatakovich V.A., Vasilenko A.M. Realizatsiya v sisteme monitoringa operatsiy raspoznavaniya i klassifikatsii morskikh tseley // Datchiki i sistemy – M.: 2019. – № 1(232). – S. 14–17.
21. Pyatakovich V.A., Rychkova V.F. Parametricheskaya optimizatsiya neyrosetevoy sistemy klassifikatsii morskikh tseley po kriteriyu nadezhnosti // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – SPb.: 2018. № 4 (42) Tom 5. S. 153–162.

УДК 539.4

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕДОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СУДНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОЛОГИИ СЦЕПЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Владимир Александрович Коршунов**

кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики корабля  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: korshunov@corp.smtu.ru

**Роман Сергеевич Мудрик**

магистрант кафедры строительной механики корабля  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: roman.morning@gmail.com

**Дмитрий Александрович Пономарев**

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры строительной механики корабля  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: dmitriy.smtu@gmail.com

**Александр Александрович Родионов**

профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой строительной механики корабля  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: rodionovsmk@yandex.ru

### Аннотация

В работе рассмотрены возможности численного моделирования взаимодействия корпуса судна с ледяным полем с помощью метода конечных элементов и с применением методологии сцепляющих элементов на примере движения судна в сплошном ледяном поле. Выполнено определение зависимости величины ледового сопротивления от курсового угла для перспективных судов ледокольного типа. Полученные статистические величины позволили оценить характер влияния курсового угла на ледовое сопротивление. Исследованы характерные формы разрушения льда и поведение битого льда при различных скоростях движения. Рассмотрены различные по точности и ресурсоемкости способы учета водной среды. Установлено, что в рассматриваемых условиях движения допустимо использовать упрощенный учет водной среды. Полученные результаты демонстрируют возможности численных моделей при исследовании процесса взаимодействия судов и плавучих объектов с ледовым полем.

**Ключевые слова:** сцепляющие элементы, метод конечных элементов, разрушение, ледовое сопротивление, моделирование разрушения льда.

## NUMERICAL MODELING OF THE ICE RESISTANCE OF A SHIP WITH COHESIVE ELEMENTS METHODOLOGY

**Vladimir A. Korshunov**

Ph.D. in Technology, associate professor of department of ship mechanics  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: korshunov@corp.smtu.ru

**Roman S. Mudrik**

master student of department of ship mechanics  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: roman.morning@gmail.com

**Dmitry A. Ponomarev**

Ph.D. in Technology, senior lecturer of department of ship mechanics  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: dmitriy.smtu@gmail.com

**Alexander A. Rodionov**

Dr.Sci.Tech, professor, head of department of ship mechanics  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: rodionovsmk@yandex.ru

### Abstract

The paper considers the possibilities of numerical modeling of the interaction of the ship's hull with an ice field using the finite element method and with the use of the coupling elements methodology using

the example of vessel movement in a continuous ice field. The determination of the dependence of the magnitude of the ice resistance on the heading angle for prospective icebreaking vessels has been carried out. The obtained statistical values made it possible to assess the nature of the influence of the heading angle on the ice resistance. The characteristic forms of ice destruction and the behavior of broken ice at various speeds were investigated. Various methods of accounting for the aquatic environment are considered in terms of accuracy and resource intensity. It is established that under the considered traffic conditions it is permissible to use simplified accounting of the aquatic environment. The results obtained demonstrate the capabilities of numerical models in the study of the interaction of ships and floating objects with an ice field.

**Key words:** cohesive elements, finite element method, destruction, ice resistance, modeling of ice destruction.

## Введение

Проведение поисково-разведывательных работ на большинстве арктических лицензионных участков, характеризующихся тяжелой ледовой обстановкой, при традиционных методах и способах организации работ, а также силами существующей техники затруднительно, неэффективно, а в большинстве случаев невозможно. Одним из перспективных направлений решения поставленной задачи является создание и использование принципиально новой схемы организации и проведения поисково-разведочных работ на арктическом шельфе с использованием автономных комплексов обеспечения. Такой комплекс состоит из плавучей базы обеспечения и многофункциональных ледокольных судов обеспечения самого высокого ледового класса. Реализация такой схемы позволит не только обеспечить проведение поисково-разведочного бурения практически на всех лицензионных участках, но и значительно сократит типаж и количество требуемого для этого флота. Перед судами автономного комплекса обеспечения ставятся новые задачи по управлению ледовой обстановкой с целью минимизации воздействий ледовых нагрузок на буровую установку от дрейфующих ледовых образований. В связи с этим в процессе проектирования судов комплекса возникает задача получения заданных значений ледовых характеристик. Традиционно решение поставленной задачи обеспечивается модельными испытаниями в ледовом бассейне. Однако модельные ледовые испытания имеют целый ряд существенных ограничений, что не позволяет получить достоверную оценку природных явлений. Аналитические методы не требуют больших ресурсов, но базируются на большом количестве допущений, что снижает качество оценки [1-2].

В последнее время все больший интерес вызывает использование численных методов для моделирования процессов взаимодействия конструкций судов и морских сооружений с ледовым полем или ледовыми образованиями [3-5]. Развитие и использование современных CAE-систем в перспективе даст более точную и наглядную картину этого процесса и открывает возможности учета большего числа параметров и моделирования широкого спектра сопутствующих явлений, для которых натурные измерения единичны, либо вовсе отсутствуют.

Качество результатов численного моделирования с помощью метода конечных элементов определяется рядом факторов:

способом учета окружающей среды (воздуха, воды), алгоритмами контактного взаимодействия и уровнем дискретизации составляющих частей модели, граничными и начальными условиями, выбором моделей поведения материалов и назначаемыми механическими свойствами для всех объектов моделирования. Поскольку характеристики ледового сопротивления судна непосредственно определяются взаимодействием корпуса с разрушаемыми ледовыми образованиями особое значение приобретает качество моделирования процесса разрушения льда.

## 1. Модель разрушения льда

Разрушения в моделях метода конечных элементов обычно реализуется путем деактивации или удаления конечных элементов, в которых напряжения превысили заданный предел. Понятно, что сетка конечных элементов в зоне разрушения должна быть достаточно мелкой [6]. Для ледовых образований такой способ моделирования не очень подходит, поскольку лед, разрушаемый при сжатии, продолжает участвовать в процессе взаимодействия конструкции корпуса и ледового образования, формируя зону контакта в виде нагромождения обломков льда, или льдо-водной среды.

При разрушении льда численная модель должна формировать траекторию трещины разрушения, учитывать перенос массы обломков льда на контактной поверхности и откалывание более крупных ледяных образований, сохранять объем льда.

Перечисленным требованиям удовлетворяет, принятая в работе методология сцепляющих элементов (МСЭ) [7-8]. Она базируется на введении в численную модель ледового образования между твердотельными конечными элементами дополнительных сцепляющих конечных элементов. Сцепляющие и твердотельные элементы имеют общие узлы для прямой передачи деформаций и напряжений. Для сцепляющих элементов задается специальная модель материала, в которой усилие в элементе является функцией смещения между поверхностями твердотельных элементов, т.е. описывается законом связи усилия и перемещения.

Для моделирования хрупкого разрушения льда используется идеально упругая модель материала. Предполагается, что такого рода поведение будет реализовываться при взаимодействии корпуса судна со льдом. Параметрами данной модели

выступают: модуль упругости, коэффициент Пуассона и плотность.

Для моделирования сцепляющих элементов используется модель материала с заданием усилия сцепления, являющегося функцией перемещения поверхностей раскрытия трещины. Инициализация и рост трещины может происходить только по сцепляющим элементам. В настоящей работе используется билинейный закон связи усилия и перемещения с учетом повреждений, которая учитывает первую и вторую формы разрушения (нормальный отрыв и сдвиг).

Сцепляющий элемент отключается, когда перемещение достигает критического значения. Максимальное усилие, критическое перемещение, начальная жесткость и энергия разрушения являются параметрами принимаемой модели материала.

Выбор параметров модели материала представляет уже самостоятельную проблему, однако по мнению авторов эта методология перспективна и позволит производить оценки не только глобальных, но и локальных ледовых нагрузок с возможным учетом нелинейного деформирования самих конструкций.

В работе продемонстрированы возможности использования метода конечных элементов с применением МСЭ на примере численного моделирования взаимодействия корпуса судна с ледяным полем при его движении с заданным курсовым углом. Физико-механические свойства материала твердотельных и сцепляющих элементов различны, но интегральные характеристики модели льда должны соответствовать реальным. Реализация численных моделей задачи выполнена с помощью программного продукта LS-Dyna [12].

## 2. Расчётная модель движения судна в ледовом поле

Рассматривался процесс движения с постоянной скоростью многофункционального ледокольного судна обеспечения относительно неподвижного сплошного ледового поля толщиной 0,6 м. Варьировались углы между вектором скорости и ДП судном, а также сами скорости. Рассматриваемое ледяное поле во всех расчетных случаях имеет размер 200 м в длину и 200 м в ширину, что позволяет минимизировать влияние краевых эффектов.

Модель процесса движения многофункционального ледокольного судна обеспечения в ледовом поле состоит из модели судна, модели ледового поля и модели водной среды. Главные размерения судна представлены в табл.1.

Ледовое поле моделировалось твердотельными конечными элементами с размерами элемента в плане 2м на 2м. Дискретизация расчетной области ледяного поля выполнена таким образом, чтобы приходилось по одному твердотельному конечному элементу по толщине. В качестве граничных условий применялись условие симметрии по краям ледовой пластины.

Таблица 1

Размерения модели судна

Величина	Значение
Длина (м)	80
Ширина (м)	22
Осадка (м)	6,5
Коэффициент полноты	0,72

Корпус судна по мимо перемещения в горизонтальной плоскости мог двигаться в вертикальном направлении, изменять угол крена и угол дифферента. Он моделировался оболочечными элементами с максимальным размером в плане 2м.

Рассматривалось два варианта учета водной среды: упрощенный в виде гидростатического давления на ледовую пластину и явного моделирования водного бассейна глубиной 14м. Последний вариант требует построения конечно-элементной модели водной среды с заданием ее модели поведения, что позволяет в полной мере учесть гидродинамические особенности силового взаимодействия между корпусом судна и ледовыми образованиями. Однако расчет в таком случае выполняется с привлечением Произвольной Лагранжего-Эйлеровой формулировки [7] и требует значительных вычислительных ресурсов.

Расчетная модель процесса, включающая в себя конечно-элементную модель корпуса многофункционального ледокольного судна обеспечения, пластины ледового поля и водного бассейна в двух вариантах представлена на рис. 1.

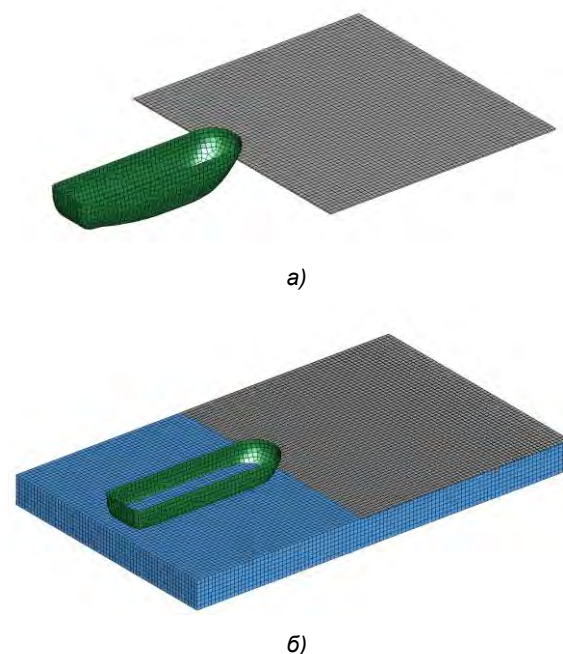


Рис. 1 Конечно-элементная модель корпуса судна и ледового поля без учета (а) и с учетом (б) внешней среды

Общее число конечных элементов модели для первого варианта составило 21,0 тыс., для второго

варианта с дискретизацией области водного бассейна - 151,5 тыс.

Авторами была разработана и внедрена в программный продукт LS-DYNA пользовательская функция учета гидростатического давления на ледовую пластину.

Гидростатическое давление, действующее на поверхность объекта, находящегося в жидкости

$$p = \rho g \cdot \max(0, -z), \tag{1}$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $g$  – ускорение свободного падения. Поверхность  $S$  в данном случае является внешней поверхностью конечного элемента

$$S = \{x_i N_i(\xi, \eta) : -1 \leq \xi, \eta \leq 1\}, \tag{2}$$

где  $N_i$  – это параметрическая функция формы и  $x_i = (x_i, y, z_i)^T$  – вектор узловых координат поверхности. Следовательно давление может быть записано в следующем виде

$$p = \rho g \cdot \max(0, -z_i N_i). \tag{3}$$

Оно приложено в направлении противоположном направлению нормали к поверхности. Из принципа возможных перемещений следует, что

$$- \int_S p \mathbf{n}^T \delta \mathbf{x} dS = \mathbf{f}_I^T \delta \mathbf{x}_I. \tag{4}$$

Левая часть этого выражения представлена в виде

$$- \int_S p \mathbf{n}^T \delta \mathbf{x} dS = \rho g z_j \int_{S_{z \leq 0}} N_j N_i dS \mathbf{n}^T \delta \mathbf{x}_I, \tag{5}$$

где  $S_{z \leq 0} = S \cap \{x : z \leq 0\}$ . В результате узловые усилия в конечном элементе равны

$$\mathbf{f}_I = \rho g z_j \int_{S_{z \leq 0}} N_j N_i dS \mathbf{n}. \tag{6}$$

В реализованной функции любые искаженные поверхности конечного элемента приводятся к плоскому виду.

Сцепляющие элементы, располагающиеся между твердотельными конечными элементами пластины, используются в модели ледового поля (рис.2).

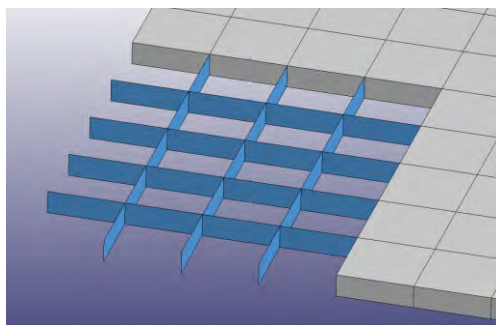


Рис. 2 Конечно-элементная модель ледового поля, часть объемных элементов не показана

Задание физических характеристик для твердотельных и сцепляющих элементов ледового поля должно выполнено таким образом, чтобы получить заданные значения для инерционных и жесткостных параметры моделируемого льда. В

настоящей работе использованы рекомендации, приведенные в [13]. Принятые значения для плотности и модуля упругости твердотельных и сцепляющих элементов представлены в табл.2. Чтобы избежать появления форм деформирования с нулевой энергией деформации (эффекта «песочных часов»), задействованы методы контроля, базирующиеся на введении в систему дополнительных внутренних узловых сил.

Таблица 2

Характеристики материала льда

Наименование	Величина	Значение
Интегральные характеристики материала льда	Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	910
	Модуль Юнга (ГПа)	1,77
Характеристики материала объемных элементов льда	Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	455
	Модуль Юнга (ГПа)	1,96
Характеристики материала сцепляющих элементов льда	Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	170
	Модуль Юнга (ГПа)	11,5

Расчетная модель корпуса принималась абсолютно жесткой, материал корпуса – сталь, характеристики представлены в табл.3.

Таблица 3

Характеристики материала корпуса судна

Величина	Значение
Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	7800
Модуль Юнга (ГПа)	200
Коэффициент Пуассона	0,3

При явном моделировании водного бассейна для передачи взаимодействия между водой (описываемой в Эйлеровой формулировке) и корпусом судна, ледяным полем (описываемых в Лагранжевой формулировке) используется Лагранжево-Эйлерово связывание, базирующееся на штрафном методе. Данный метод основан на определении относительного перемещения между узлами жидкости и телом при прохождении этих узлов сквозь друг друга, пропорционально величине данного перемещения в систему вводятся дополнительные узловые силы, которые характеризуют контактные силы [9-11].

Для моделирования взаимодействия льда и судна используется контакт типа \*CONTACT\_ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE. Методика, заложенная в данный тип контакта, позволяет моделировать контактное взаимодействие после полного или частичного разрушения тел. Контактный алгоритм строится на основе сегментов. Набор сегментов включает в себя все свободные грани конечных элементов, принадлежащих разрушаемому телу. После отключения сцепляющих элементов для предотвращения проникновения элементов сквозь друг друг данный набор сегментов обновляется: добавляются новые свободные грани.

### 3. Результаты расчетного анализа

Выполненные расчеты по разработанным моделям позволили получить сравнительную оценку ледовых характеристик многофункционального ледокольного судна обеспечения для различных вариантов расчета. Картина разрушения ледового поля при движении судна с углом  $0^\circ$  между вектором скорости и ДП судном со скоростью 1 м/с при двух вариантах учета водной среды показана на рисунке 3.

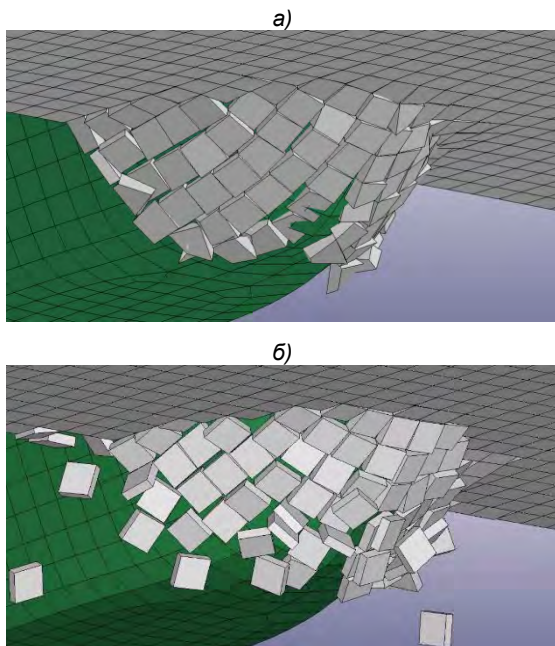


Рис. 3 Вид снизу на нос судна: а) – при явном моделировании жидкости, б) – при применении только гидростатических сил

Видно, что упрощенный учет водной среды демонстрирует больший разброс обломков льда.

Полученные в результате расчета зависимости продольной силы сопротивления от времени были сглажены для устранения шумовых помех медианным фильтром с пятью соседними значениями, они представлены на рисунке 4.

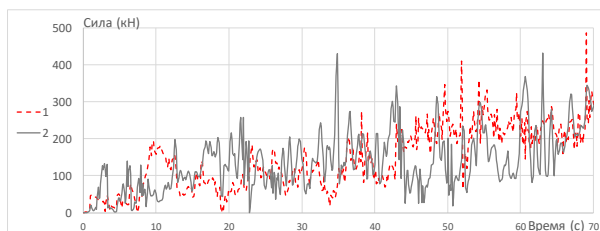


Рис. 4 График изменения продольной силы сопротивления от времени (1 – при явном моделировании жидкости, 2 – при применении только гидростатических сил)

Силы сопротивления в рассматриваемых вариантах расчета имеют ярко выраженный осциллирующий характер. Среднее значение силы возрастает по мере разрушения ледяного покрова и затем стабилизируется с накоплением ледовых обломков. Стабилизированное среднее значение силы сопротивления для упрощенного учета водной среды равно 187 кН, а среднеквадратичное отклонение – 202 кН. При явном моделировании водного бассейна получены значения 181 кН, а среднеквадратичное отклонение 96,8 кН. Важно отметить, демпфирующие эффекты, которые учитываются в явном моделировании, на осредненные значения сопротивление при рассматриваемых скоростях практически не влияют. Поэтому в целях снижения вычислительных затрат дальнейшие расчеты выполнялись при упрощенном учете водной среды.

Расчеты были выполнены для восьми расчетных случаев, соответствующих различным значениям углов между вектором скорости и диаметральной плоскости судна:  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  при двух скоростях движения: 1 м/с и 3 м/с.

Поэтому при моделировании движения судна под разными углами учитываются только гидростатические силы, действующие со стороны внешней среды. Рассматривается 8 расчетных случаев, соответствующих углам между вектором скорости и диаметральной плоскости:  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  и двум скоростям: 1 м/с и 3 м/с.

На рисунке 5 представлено графики продольной силы сопротивления при варьировании скорости и углов ориентации диаметральной плоскости. Полученные данные характеризуются периодическими скачками высокой амплитуды в моменты времени, когда происходит разрушение значительной части ледового покрова, после чего сопротивление снова снижается до следующей фазы ломки льда. В среднем сопротивление растет с увеличением значения угла. Также величина сопротивления возрастает с увеличением скорости при всех углах ориентации.

Величина и частота пиковых нагрузок возрастает с увеличением значения угла, так как площадь взаимодействия корпуса и ледового поля увеличивается и больше проявляется одновременное разрушение и откалывание больших фрагментов ледяного поля. При скорости равной 3 м/с и угле  $90^\circ$  наблюдаются наибольшие пиковые значения ледового сопротивления.

Формы разрушения в зависимости от угла показаны на рис.6

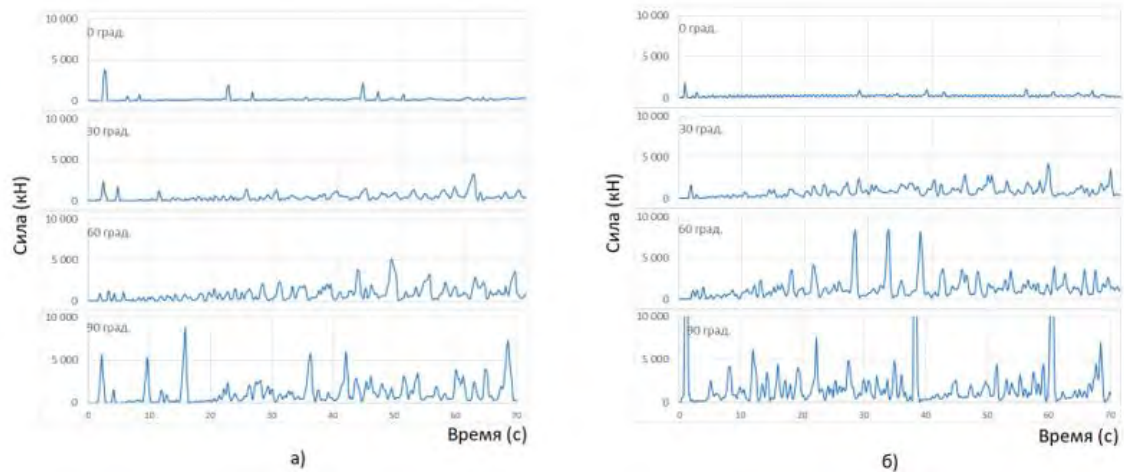


Рис. 5 График изменения продольной силы сопротивления от времени для различных углов: а) при поступательной скорости 1 м/с, б) при поступательной скорости 3 м/с

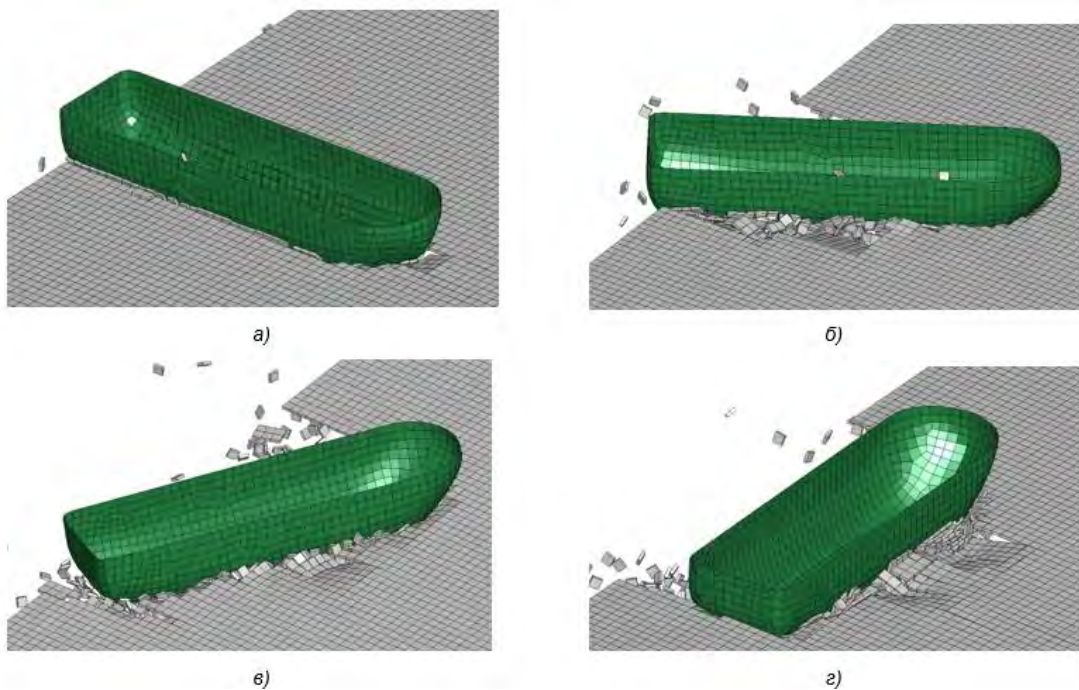


Рис.6. Формы разрушения льда при скорости 1 м/с для углов: а) 0°, б) 30°, в) 60°, г) 90°

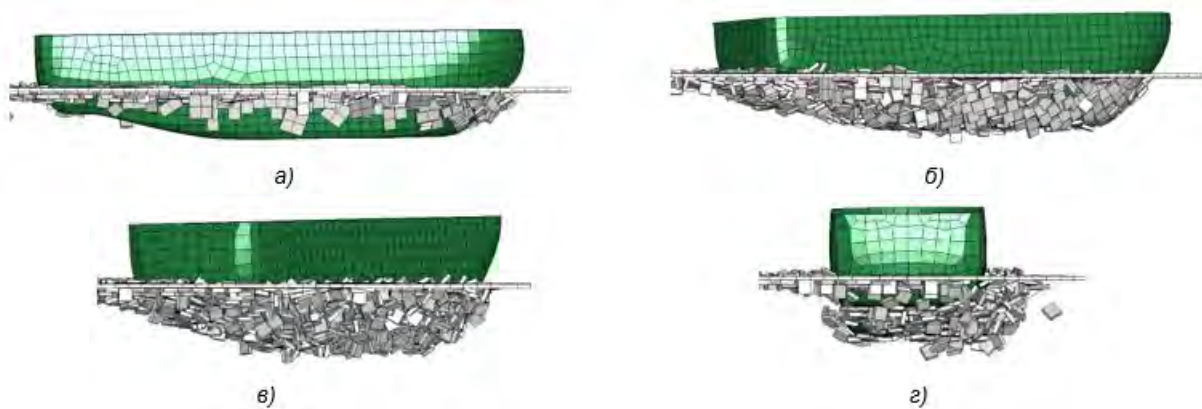


Рис. 7 Вид с боку, со стороны взаимодействия корпуса и ледового поля при скорости 1 м/с для углов: а) 0°, б) 30°, в) 60°, г) 90°

После обработки результатов моделирования получены значения математического ожидания (рис. 8) и среднеквадратичного отклонения (рис. 9) для продольных сил для разных значений углов.

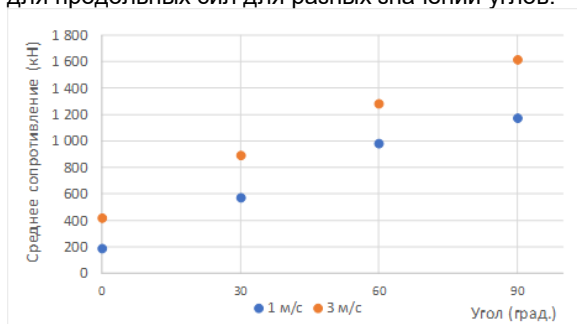


Рис. 8 Среднее значение силы сопротивления в зависимости от угла при разной скорости

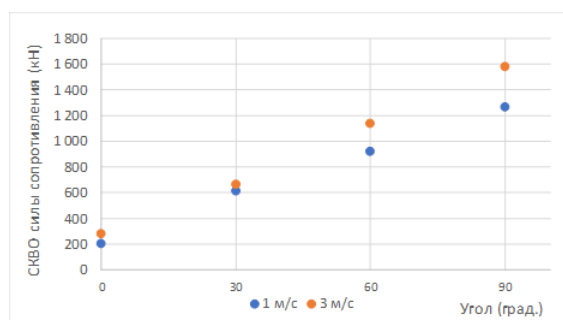


Рис. 9 Среднеквадратичное отклонение силы сопротивления в зависимости от угла при разной скорости.

Среднее значение контактного усилия при взаимодействии корпуса с ледяным полем практически линейно возрастает с увеличением угла и зависимость практически одинакова для обеих рассматриваемых скоростей. Но среднеквадратичное отклонение для скорости 3 м/с возрастает в зависимости от угла быстрее, чем при 1 м/с. Это связано с увеличением площади взаимодействия и с возрастанием числа одновременно откалываемых больших по размеру фрагментов ледового поля.

С увеличением глубины проникновения судна в ледяное поле ледовая нагрузка постоянно растет из-за увеличения зоны контакта корпуса и ледового поля, а также ввиду накапливания битого льда, который начинает двигаться вместе с корпусом (рис.7). Стоит отметить, что при движении судна лагом возникает сильная бортовая качка, из-за перемещения битого льда под днищем судна с одного борта на другой.

### Заключение

На сегодняшний день использование метода конечных элементов позволяет с необходимой достоверностью решать задачу поиска напряженно

деформированного состояния, но точность этого решения не может превышать точности решения первой проблемы – вычисления внешних сил, действующих на конструкцию. С развитием численных методов, позволяющих адекватно моделировать поведения льда и его разрушение, появилась возможность моделирования взаимодействия льда с конструкциями в различных постановках. Применение методологии сцепляющих элементов является одним из перспективных способов численного моделирования разрушения ледовых образований. Но точность моделирования происходящих при этом процессов определяется адекватным заданием большого количества характеристик льда. В настоящее время еще преждевременно гарантировать замену модельных испытаний в ледовом бассейне на серию численных расчетов, но уже сейчас с их помощью них можно проводить исследования влияния различных факторов на параметры взаимодействия льда с конструкцией, снизить количество дорогостоящих модельных испытаний в том числе за счет получения промежуточных значений с помощью численного моделирования.

В работе реализовано численное моделирование процесса движения многофункционального ледокольного судна обеспечения в ледяном поле.

Получены формы разрушения льда и картины поведения фрагментов разрушаемого ледового поля вокруг движущегося при различных углах судна.

Рассмотрены различные по точности и ресурсоемкости способы учета водной среды. Установлено, что в рассматриваемых условиях движения допустимо использовать упрощенной учет водной среды.

Вычисленные статистические параметры позволили оценить характер влияния угла между вектором скорости и диаметральной плоскостью на ледовое сопротивление.

Полученные результаты демонстрируют возможности численных моделей при исследовании процесса взаимодействия судов и плавучих объектов с ледовым полем. Однако, пока можно оценивать только характер данного взаимодействия, для формирования универсальных адекватных численных моделей требуется провести дополнительно ряд модельных и натурных испытаний.

Исследования, выполненные в данной работе, подтверждают широкие возможности метода конечных элементов совместно с методологией сцепляющих элементов по решению задач взаимодействия конструкций судов и морских инженерных сооружений с разрушаемыми ледовыми образованиями для оценки ледовых характеристик и ледовой прочности.

### Литература

1. Ким С.Д., Финагенов О.М., Т.Э. Уварова Определение ледовых нагрузок на сооружения континентального шельфа по нормам различных стран. Вести газовой науки: Современные подходы и перспективные технологии в проектах освоения нефтегазовых месторождений российского шельфа. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. – № 3 (14). – С. 97–103.



2. Kellner L., Herrnring H., Ring M., Review of ice load standards and comparison with measurements, Proceedings of the ASME 2017 36 th International Conference on Ocean, Offshore and Arc-tic Engineering (2017).
3. Kuutti J., Kolari K., Marjavaara P., Simulation of ice crushing experiments with cohesive surface methodology, Cold Regions Science and Technology 92 (2013) 17–28.
4. Daiyan H., Sand B., Numerical Simulation of the Ice-Structure Interaction in LS-DYNA, 8th European LS-DYNA Users Conference, Strasbourg - May 2011 (2011).
5. Hilding D., Forsberg J., Gürtner A., Simulation of Loads from Drifting Ice Sheets on Offshore Structures, 12. International LS-Dyna User Conference (2012).
6. P.F. Moore, I.J. Jordaаn, R.S. Taylor, Explicit finite element analysis of compressive ice failure using damage mechanics, 2013
7. Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Численное моделирование взаимодействия морских сооружений с ледовым полем. «Морской вестник». 2017. Спецвыпуск №1(13). с.41-48
8. Hauke Herrnring, Leon Kellner, Jan M. Kubiczek, Sören Ehlers. Simulation of Ice-Structure Interaction with CZM-Elements, LS-DYNA Forum 2018, Bamberg
9. Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Анализ предельных форм потери несущей способности конструктивных связей корпуса из полимерных композиционных материалов. «Труды Крыловского государственного научного центра». Вып.92 (376). СПб 2016. с.9-18.
10. Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Численное моделирование процессов деформирования судового корпуса при динамическом воздействии водо-воздушной среды. Морской Вестник, спец. выпуск №1 (13) - Труды Российского НТО судостроителей им. акад. А.Н. Крылова, вып. №4, Материалы научно-технической конференции по строительной механике корабля памяти акад. Ю.А. Шиманского 2017, стр.49-55.
11. Пономарев Д.А. Современные методы решения задачи взаимодействия конструкций с водо-воздушной средой. Морские Интеллектуальные Технологии, Научный журнал №3 (37) Т. 3 2017, стр. 30-40.
12. LSTC, LS-DYNA Keyword User's Manual: Volume II Materials Models, 2017.
13. Коршунов В.А., Мудрик Р.С., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Моделирование процессов разрушения льда с использованием методологии сцепляющих элементов. «Морские Интеллектуальные Технологии», Научный журнал № 4 (46) Т.2 2019, стр. 34-44.

#### References

1. Kim S.D., Finagenov O.M., T.E. Uvarova Opredelenie ledovyh nagruzok na sooruzheniya kontinen-tal'nogo shel'fa po normam razlichnyh stran. Vesti gazovoj nauki: Sovremennye podhody i per-spektivnye tekhnologii v proektah osvoeniya neftegazovyh mestorozhdenij rossijskogo shel'fa. – M.: Gazprom VNIIGAZ, 2013. – № 3 (14). – S. 97–103.
2. Kellner L., Herrnring H., Ring M., Review of ice load standards and comparison with measurements, Pro-ceedings of the ASME 2017 36 th International Conference on Ocean, Offshore and Arc-tic Engineering (2017).
3. Kuutti J., Kolari K., Marjavaara P., Simulation of ice crushing experiments with cohesive surface method-ology, Cold Regions Science and Technology 92 (2013) 17–28.
4. Daiyan H., Sand B., Numerical Simulation of the Ice-Structure Interaction in LS-DYNA, 8th European LS-DYNA Users Conference, Strasbourg - May 2011 (2011).
5. Hilding D., Forsberg J., Gürtner A., Simulation of Loads from Drifting Ice Sheets on Offshore Structures, 12. International LS-Dyna User Conference (2012).
6. P.F. Moore, I.J. Jordaаn, R.S. Taylor, Explicit finite element analysis of compressive ice failure using dam-age mechanics, 2013
7. Korshunov V.A., Ponomarev D.A. Rodionov A.A. CHislennoe modelirovanie vzaimodejstviya morskikh sooruzhenij s ledovym polem. «Morskoj vestnik». 2017. Specvypusk №1(13). s.41-48
8. Hauke Herrnring, Leon Kellner, Jan M. Kubiczek, Sören Ehlers. Simulation of Ice-Structure Interaction with CZM-Elements, LS-DYNA Forum 2018, Bamberg
9. Korshunov V.A., Ponomarev D.A., Rodionov A.A. Analiz predel'nyh form poteri nesushchej sposob-nosti konstruktivnyh svyazej korpusa iz polimernyh kompozicionnyh materialov. «Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra». Vyp.92 (376). SPb 2016. s.9-18.
10. Korshunov V.A., Ponomarev D.A., Rodionov A.A. CHislennoe modelirovanie processov deformiro-vaniya sudovogo korpusa pri dinamicheskom vozdejstvii vodo-vozdushnoj sredy. Morskoj Vestnik, spec. vypusk №1 (13) - Trudy Rossijskogo NTO sudostroitelej im. akad. A.N. Krylova, vyp. №4, Materialy nauchno-tekhneskoj konferencii po stroitel'noj mekhanike korablya pamyati akad. YU.A. SHimanskogo 2017, str.49-55.
11. Ponomarev D.A. Sovremennye metody resheniya zadachi vzaimodejstviya konstrukcij s vodo-vozdushnoj sredoj. Morskie Intellektual'nye Tekhnologii, Nauchnyj zhurnal №3 (37) Т. 3 2017, стр. 30-40.
12. LSTC, LS-DYNA Keyword User's Manual: Volume II Materials Models, 2017.
13. Korshunov V.A., Mudrik R.S., Ponomarev D.A., Rodionov A.A. Modelirovanie processov razrusheniya l'da s ispol'zovaniem metodologii scepilyayushchih elementov. «Morskie Intellektual'nye Tekhnologii», Nauchnyj zhurnal № 4 (46) Т.2 2019, стр. 34-44.



Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE  
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ISSN 2588-0233, ISSN № 2073-7173

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

e-mail: [mit-journal@mail.ru](mailto:mit-journal@mail.ru) [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов.

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)
3. Одна рецензия на публикуемую статью по соответствующей специальности с подписью. 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 и акт к нему от каждого из авторов
6. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) могут быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу [mit-journal@mail.ru](mailto:mit-journal@mail.ru) (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

**Инструкция по оформлению статьи и другие документы можно скачать с нашего сайта [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru) из раздела «для авторов»**

Документы должны быть присланы по почте в адрес редакции.

**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 с 2019г. 12000 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**