

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) 011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010001010101

ISSN 2588-0233 (on line) 1001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010

10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110

00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100

00110101001101001000010110100101010001001000011111100110011001101101011001110000001110010100101

11011100110010101111001010100101001101001110001011001010011001010111100101011100101101001010

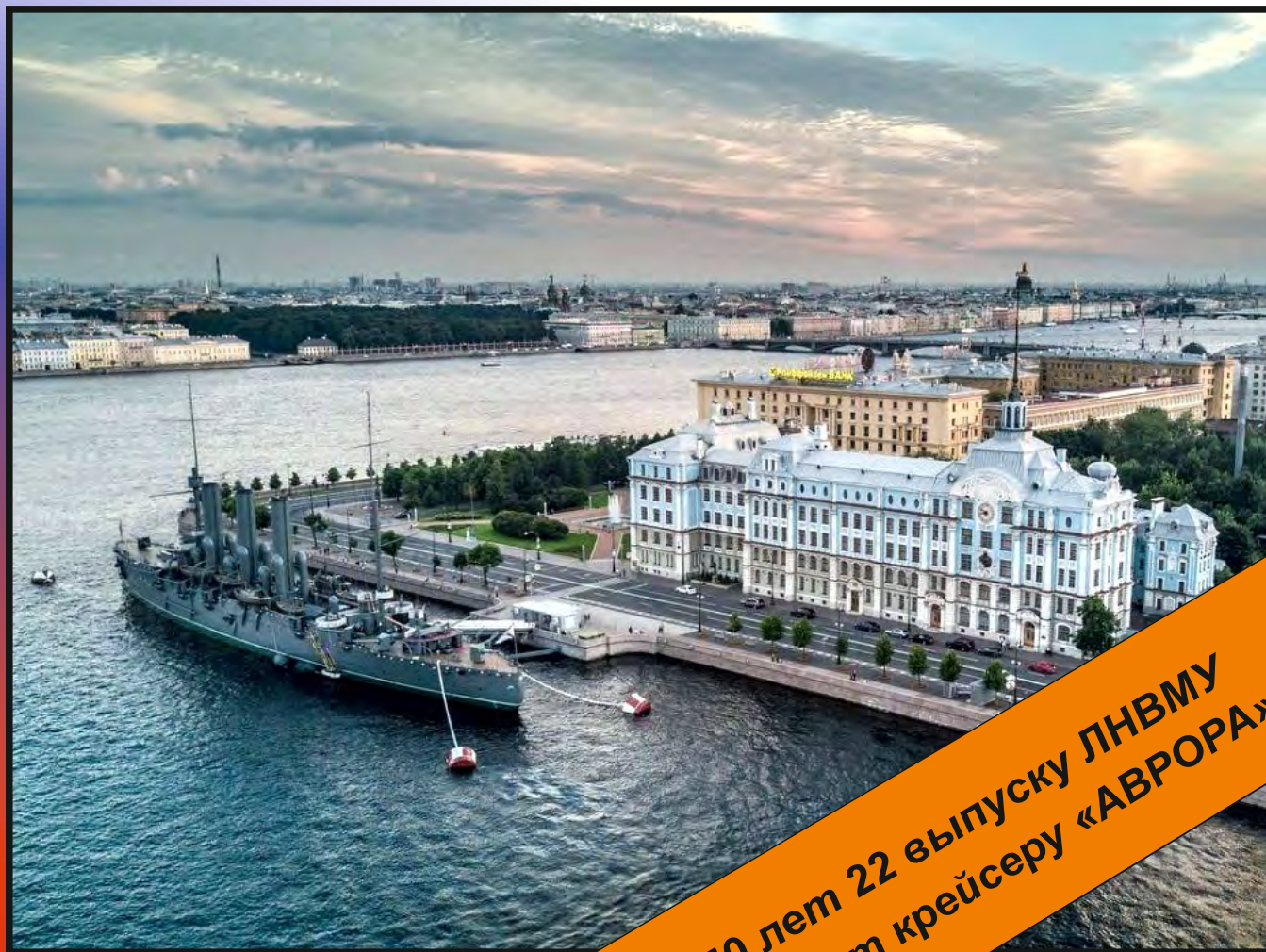
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001

11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100

001010011100110100111100010100101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010



№ 2 (48) Т.1 2020  
2 PART 1 2020



50 лет 22 выпуску ЛНВМУ  
120 лет крейсеру «АВРОРА»



# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 2 том 1 2020 Сквозной номер 48

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.

Год основания – 2008. Периодичность издания - 4 номера в год. Форма выпуска: печатный, электронный. Язык текстов: русский, английский. Язык метаданных: русский, английский.

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

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), 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 (Emerging Sources Citation Index ESCI).

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 год и с № 3(25) 2014 полные выпуски размещены на сайте [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru) в открытом доступе. Стоимость публикации включает: публикацию в журнале, электронное издание журнала, размещение в E-library и в Web of Science (Emerging Sources Citation Index ESCI). Для аспирантов публикации бесплатно.

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	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 и документы к статье представляются в редакцию в электронном виде (e-mail: [mit-journal@mail.ru](mailto:mit-journal@mail.ru))

Учредитель-издатель: Общество с ограниченной ответственностью «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» (ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»).

Свидетельства о регистрации СМИ ПИ № ФС77-32382 от 09.06.2008, Эл № ФС72-33245 от 19.09.2008.

Член Ассоциации научных редакторов и издателей.

Адрес: 190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3.

Тел./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



ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

# MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 2 part 1 2020 [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)

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 (Emerging Sources Citation Index ESCI).**

Frequency of publication - 4 issues per year.

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).

### The journal is coming since 2008

#### Publication frequency — 4 issues per year

The journal is included into the system of Russian Science Citation Index u and into international abstract database Web of Science (Emerging Sources Citation Index (ESCI)).

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

Member of Association of science editors and publishers.

**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





ISSN 2073-7173

ISSN 2588-0233

# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 2 том 1 2020 (Сквозной номер 48)

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

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 университет, Санкт-Петербург

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

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

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

**Члены Редколлегии**

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

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

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, Владивосток

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

В.А. Евтеев, д.т.н., Объединенная судостроительная корпорация, Санкт-Петербург

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

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», Санкт-Петербург

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

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

Ю.С. Федосенко, д.т.н., профессор, Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород

**Редакционный Совет**

**Сопредседатели**

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

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

**Члены Совета**

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

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

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

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

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

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

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», Санкт-Петербург

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

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





ISSN 2073-7173  
ISSN 2588-0233

# MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 2 part 2 2020 [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)

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, Dr. Sci. (Eng.), 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

Yu.S. Fedosenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, 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>Гурьев Ю.В., Слуцкая М.З.</b> Основные закономерности гидродинамического воздействия природных морских условий на подводные объекты.....	10
<b>Козин В.М.</b> Зависимость параметров волн в битом льду от его сплоченности в условиях мелководья.....	16
<b>Бимберекв П.А.</b> Анализ возможных соотношений плотностей потока у корпуса модели и её движителя по выражениям для оценки параметров пропульсивного комплекса при масштабном моделировании ходкости судов с использованием самоходных моделей (в порядке обсуждения)....	21
<b>Притыкин А.И.</b> Анализ упругопластического деформирования балок с присоединенным пояском МКЭ.....	27
<b>Мамонтов А.И., Китаев М.В., Суров О.Э., Новиков В.В., Молоков К.А.</b> Расчет давления при динамическом контакте корпуса судна с грунтом.....	34
<b>Козин В.М.</b> Возможности повышения эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова за счет использования близости берега к месту выполнения ледокольных работ.....	41
<b>Бугаев В.Г., Новиков В.В., Молоков К.А., Славгородская Д.В.</b> Численный анализ ударных давлений на борт при движении судна во льдах.....	47
<b>Молоков К.А., Мамонтов А.И., Новиков В.В., Герман А.П.</b> Аналитический метод определения критической длины трещин в судовых конструкциях на основе структурно-деформационного анализа.....	56
<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ</b>	
<b>Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л.</b> Исследование аварийных ситуаций, вызванных отказом в каналах системы управления движением экраноплана.....	64
<b>Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Таранцев А.А., Маринов М.Л.</b> Исследование аварийных ситуаций, вызванных отказом главных двигателей экраноплана.....	70
<b>Буров Ю.П.</b> Оптимизация характеристик контейнерного судна с учетом прогнозируемой цены его постройки и эксплуатации.....	76
<b>ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА</b>	
<b>Барышников С.О., Сухотерин М.В., Кныш Т.П., Пижурин Н.Ф.</b> Устойчивость стабилизаторов глубоководных аппаратов.....	83
<b>Тепляков М.В., Лошенко М.Д.</b> О причинах снижения сопротивления изоляции при эксплуатации гермовводов.....	91
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)</b>	
<b>Соломахин Ю.В., Цыганкова Л.П., Невская И.В., Фершалов А.Ю.</b> Потери кинетической энергии потока газа на краях активных дуг осевых малорасходных турбин.....	98
<b>Грищенко Д.В.</b> Методы автоматического анализа параметров вибрации для диагностики судовых роторных машин.....	102
<b>ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ</b>	
<b>Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Борисов А.С.</b> Анализ особенностей колебаний пришвартованного судна при волнении.....	108
<b>Мартынов В.Л., Дорошенко В.И., Скрипник И. Л.</b> Сеть метеорной связи в системе обеспечения мониторинга технических средств безопасности мореплавания Северного морского пути.....	118
<b>ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ</b>	
<b>Куклев Е.А., Петухов Г.М.</b> Угрозы безопасности воздушных и морских перевозок в прибрежных зонах акваторий с активной вулканической деятельностью.....	125



<b>Ложкина О.В., Рогозинский Г.Г., Ложкин В.Н., Малыгин И.Г., Комашинский В.И.</b> Интеллектуальные технологии для поддержки принятия управленческих решений в сфере экологической безопасности транспорта в больших городах-портах.....	133
<b>Костикова Е.В., Фахми Ш.С., Хасан Я.М., Селиверстов С.А., Соколов А.В., Подопригора Н.В.</b> Адаптивное спектральное кодирование изображений в системах видеонаблюдения.....	142
<b>Фахми Ш.С., Королёв О.А., Крылов Ю.Е., Костикова Е.В.</b> Модифицированный маршрут проектирования транспортных видеосистем на кристалле.....	152

#### УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

<b>Филатов В. И.</b> Нелинейная модель динамической системы прогнозирования расхода топлива судна с использованием нейронной сети.....	160
<b>Горгуца Ю.В.</b> Определение простоев судов при обработке на рейдовых причалах.....	166
<b>Горгуца Ю.В.</b> Модели, описывающие обработку судов на рейдовых причалах.....	171

#### АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

<b>Гасанов Э.А.</b> Исследование режимов и расчет параметров работы частотно-управляемого электропривода судового якорного устройства.....	178
--	-----

#### УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

<b>Исаев А.А., Исаева Л.А.</b> Оценка имиджа судоходной компании.....	184
<b>Кожевин Д.Ф., Поляков А.С., Скороходов Д.А., Каминский В.Ю., Стариченков А.Л.</b> Экологическая безопасность при авариях на морской составляющей мультимодальной трубопроводной системы.....	188
<b>Айгумов Т.Г., Мелехин В.Б.</b> Управление инвестиционной деятельностью и ростом объемов производства кораблестроительных компаний в сфере маломерного судостроения .....	197

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

<b>Стариченков А.Л., Стариченкова Е.А.</b> Компьютерный тренажер управления движением судна на подводных крыльях.....	203
---	-----

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

<b>Недоступ А.А., Ражев А.О., Наумов В.А., Дятченко С.В., Коновалова К.В., Соколова Е.В.</b> Расчет прогиба ваера численным методом точечных масс при компьютерном моделировании.....	210
<b>Синько А.Н., Никонова Т.Ю., Юрченко В.В., Матешов А.К., Марченко И.А.</b> Математическая модель процесса точения с использованием вибрационного воздействия на режущий инструмент...	216

CONTENTS	page
<b>THEORY OF SHIP AND STRUCTURES</b>	
<b>Jurij V. Gur'ev, Marija Z. Sluckaja</b> The main laws of hydrodynamic effects of natural marine conditions on underwater objects.....	10
<b>Viktor M. Kozin</b> Dependence of wave parameters in broken ice on its cohesion in shallow water.....	16
<b>Pavel A. Bimberekov</b> Analysis of possible ratios of flux density at the shell model and its propeller in the expressions to evaluate parameters of propulsion complex at scale modeling propulsion of ships using self-propelled models (in order of discussion) .....	21
<b>Alexej I. Pritykin</b> Analysis by FEM of elasto-plastic deformation of beams with associated plate.....	27
<b>Andrey I. Mamontov, Maksim V. Kitaev, Oleg E. Surov, Valeriy V. Novikov, Konstantin A. Molokov</b> Dynamic contact pressure calculation of the hull with the seabed.....	34
<b>Viktor M. Kozin</b> Possibilities to improve the effectiveness of the resonant method of destruction of the ice cover by using the proximity of the coast to the place of performance of icebreaking works.....	41
<b>Victor G. Bugaev, Valery V. Novikov, Konstantin A. Molokov, Daria V. Slavgorodskaya</b> Numerical analysis of impact pressures on board during vessel movement in ice.....	47
<b>Konstantin A. Molokov, Andrey I. Mamontov, Valery V. Novikov, Andrey P. German</b> Analytical method for determining the critical crack length in ship structures based on structural-deformation analysis	56
<b>SHIP DESIGNING AND STRUCTURE</b>	
<b>Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov, Alexey L. Starichenkov</b> The study of emergency situations caused by a failure in the channels of the motion control system of the ekranoplan.....	64
<b>Valery Yu. Kaminsky, Dmitriy A. Skorokhodov, Alexander A. Tarantsev, Marin L. Marinov</b> Investigation of accidents caused by the failure of the main engines of the ekranoplan.....	70
<b>Yury P. Burov</b> Optimization of the container ship's characteristics considering the projected cost of its construction and operation.....	76
<b>SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION</b>	
<b>Sergey O. Baryshnikov, Mikhail V. Sukhoterin, Tatiana P. Knysh, Natalia F. Pizhurina</b> Buckling of stabilizers deep-sea vehicles.....	83
<b>Michael V. Teplyakov, Margarita D. Loshenko</b> About the reasons for the decrease in insulation resistance at operation of hermetic ships cable entry seals.....	91
<b>SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)</b>	
<b>Yuriy V. Solomakhin, Lyudmila P. Tsygankova, Irina V. Nevskaya, Andrey Yu. Fershalov</b> Losses of kinetic energy of a gas flow at the edges of active arcs of axial low-flow turbines.....	98
<b>Dmitriy V. Grishchenko</b> Automatic analysis methods of vibration parameters for diagnosis of marine rotating machines.....	102
<b>PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION</b>	
<b>Dmitry P. Kovalev, Peter D. Kovalev, Aleksander S. Borisov</b> Analysis of moored ship oscillations in waves.....	108
<b>Victor L. Martynov, Victor I. Doroshenko, Igor L. Skrypnick</b> Meteor communication network in the monitoring system for technical means of navigation safety of the Northern sea route.....	118
<b>INFORMATION SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL SYSTEM ANALYSIS</b>	
<b>Evgeny A. Kuklev, Gennady M. Petukhov</b> Forecasting of the safety hazards to aviation and marine operations in some area of water with active volcanic activities.....	125
<b>Olga V. Lozhkina, Gleb G. Rogozinsky, Vladimir N. Lozhkin, Igor G. Malygin, Vladimir I. Komashinsky.</b> Smart technologies for decision-support in the management of environmental safety of transportation in big port cities.....	133
<b>Elena V. Kostikova, Shakeeb S. Fahmi, Yazeed A.A. Hasan, Svyatoslav A. Seliverstov, Artem V. Sobolev, Nickolay V. Podoprigora.</b> The fast algorithm of spectral transformation of images in video surveillance systems.....	142

<b>Shakeeb S. Fahmi, Oleg A. Korolev, Yuriy E. Krylov, Elena V. Kostikova</b> Modified route design for transport video systems on chip.....	152
--	-----

**CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION**

<b>Viktor I. Filatov</b> Non-linear model of dynamical system for prediction of Ship's fuel Consumption by Neural Network.....	160
<b>Yuliy V. Gorgutsa</b> Identifying demurrage in processing of vessels on offshore terminals.....	166
<b>Gorgutsa Y. V.</b> Models, describing vehicles processing on offshore terminals.....	171

**AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS**

<b>Elsevar A. Hasanov</b> The investigation of the modes and calculation of the operation parameters in the frequency controlled drive on the ship's anchor device.....	178
---	-----

**CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS**

<b>Alexander A. Isaev, Liudmila A. Isaeva</b> Evaluation of the image of a shipping company.....	184
<b>Dmitriy F. Kozhevin, Alexandr S. Polyakov, Dmitriy A. Skorokhodov, Valery Yu. Kaminsky, Alexey L. Starichenkov</b> Environmental safety in case of accidents on the marine component of a multimodal pipeline system.....	188
<b>Timur G. Aygumov, Vladimir B. Melekhin</b> Management of investment activities and the growth of shipbuilding companies in the field of small shipbuilding .....	197

**SOFTWARE FOR COMPUTERS**

<b>Alexey L. Starichenkov, Elizaveta A. Starichenkova</b> Computer simulator for motion control hydrofoil vessels.....	203
--	-----

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

<b>Alexander A. Nedostup, Aleksey O. Razhev, Vladimir A. Naumov, Sergey V. Dyatchenko, Karina V. Konovalova, Elana V. Sokolova.</b> Calculation of the composite waer bending using numerical mass-point method in computing simulations.....	210
<b>Alexander N. Sin'ko Tatyana Yu. Nikonova, Vasily V. Yurchenko, Arman K. Mateshov, Ilya A. Marchenko</b> Mathematical model of the turning process using vibration impact on the cutting tool...	216



**ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА**

УДК 629.015

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.001

**Основные закономерности гидродинамического воздействия природных морских условий на подводные объекты**Ю.В. Гурьев<sup>1</sup>, М.З. Слуцкая<sup>1</sup><sup>1</sup>Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», г. Санкт-Петербург

**Аннотация.** Обеспечение управляемости морских объектов серьезно усложняется при их движении в сложных условиях морского волнения, ветра и других. Для подводных объектов важным фактором, влияющим на их движение, является существенная пространственно-временная неоднородность природных гидрофизических полей плотности и скорости, а также внутренние волны, возникающие на границах резкого изменения плотности морской воды (пикноклина). Для проектирования и безопасного маневрирования в таких условиях необходимо знание основных закономерностей их воздействия на гидродинамику этих объектов. Использование натурального и модельного физического эксперимента для решения этой проблемы затрудняется ограниченными возможностями моделирования природных условий, проблемой измерения нестационарных сил и моментов, а также наличием масштабного эффекта по критерию Рейнольдса. Наиболее эффективным способом решения задачи является применение методов вычислительной гидродинамики и компьютерных технологий.

В статье излагаются результаты вычислительного эксперимента, проведенного на основе разработанных авторами физико-математической модели и численного метода прогнозирования силового воздействия морской среды на подводные объекты. Допущение о потенциальном характере течения согласуется с современными моделями как поверхностных, так и внутренних волн, и позволяет создать единую потенциальную гидродинамическую модель обтекания подводного объекта неоднородным потоком. При этом производится косвенный учет влияния вязкости на распределение давлений на корпусе путем введения специальной вихревой системы. В качестве модели внутренней волны используется модифицированная авторами двухслойная потенциальная модель Сретенского Л.Н.

На основе анализа вычислительного эксперимента сформулирован ряд новых закономерностей такого воздействия, в частности, получены качественные и количественные зависимости гидродинамических сил от параметров пикноклина и внутренней волны, кораблестроительных характеристик объекта и ряда других. Предложенный программный продукт и выявленные закономерности могут быть использованы в практике проектирования подводных объектов, эксплуатируемых в условиях пространственно-временной неоднородности гидрофизических полей Океана и при создании тренажеров-имитаторов динамики морских объектов.

**Ключевые слова:** гидрофизические поля, пикноклин, внутренние волны, математическая модель, подводный объект, потенциальная модель, вычислительный эксперимент.

**The main regularities of hydrodynamic effect caused by natural marine conditions on the underwater objects**Jurij V. Gur'ev<sup>1</sup>, Marija Z. Sluckaja<sup>1</sup><sup>1</sup>Naval Polytechnic Institute Military Educational and Scientific Center of the Naval fleet (VUNTs VMF) Naval Academy, the city of Saint Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** Ensuring the controllability of marine objects is made much more difficult when they move in complex conditions of sea waves, wind and so forth. For underwater objects an important factor affecting their movement is a substantial spatio-temporal heterogeneity of natural hydrophysical fields of density and velocity, as well as internal waves that appear at the borderlines of a rapid change of sea water density (pycnocline). For designing and safe manoeuvring in such conditions it is necessary to know the main regularities of their effect on the hydrodynamics of these objects. Using a natural and model physical experiment to solve this problem is made harder by the limited capabilities of natural conditions modeling, the problem of measurement of unsteady forces and moments, as well as existence of a scale effect according to Reynolds criterion. The most efficient method to solve this task is application of methods of computational fluid dynamics and computer technology.

The article presents the results of a computing experiment, which was conducted on the basis of a physico-mathematical model and numerical method for predicting a force impact of marine environment on the underwater objects. An assumption about a potential nature of the current is in agreement with the modern models of surface and internal waves, and this allows to create a unified potential hydrodynamical model of heterogeneity stream flowing around an underwater object. At the same time we make an indirect accounting for the effect of viscosity on pressure distribution on the hull by introducing a special vortex system. As a model for an internal wave we use a two layer potential model by L.N. Sretensky, modified by the authors.

On the basis of analysis of the computing experiment several new regularities of such effect were formulated, in particular, as the result of experiment were obtained qualitative and quantitative relationships of hydrodynamic forces with pycnocline parameters and internal wave, shipbuilding characteristics of the object and some others. The proposed software product and the revealed regularities can be used in the practice of designing underwater objects operated in

the conditions of spatio-temporal heterogeneity of the hydrophysical fields of the Ocean and in creating simulators for the dynamics of marine objects.

**Keywords:** hydrophysical fields, pycnocline, internal waves, mathematical model, underwater object, potential model, computing experiment.

### Введение

Обеспечение управляемости всех морских объектов от авианосцев до необитаемых подводных аппаратов является одной из главных задач их создателей. Эта задача серьезно усложняется если объект движется в сложных натуральных условиях, таких, например, как морское волнение, штормовой ветер, подводные течения. Для подводных объектов существенное воздействие на их динамику оказывает также пространственно-временная неоднородность гидрофизических полей плотности и скорости. Наличие градиентов плотности приводит к появлению внутренних волн (ВВ), длина и амплитуда которых существенно больше их аналогов поверхностного волнения. Двигаясь в таких условиях, подводный объект испытывает нестационарное силовое воздействие со стороны окружающей жидкости, изменяющееся по сложным, а зачастую и малоизвестным закономерностям, что оказывает заметное влияние на управление объектом, вплоть до полной потери контроля над его движением, что подтверждается как опытом эксплуатации, так и научными исследованиями [1]. Так по одной из версий гибель американской подводной лодки «Трешер» связана с воздействием внутренней волны.

Для проектирования подводных объектов, способных безопасно и эффективно совершать маневрирование в натуральных морских условиях, необходимо знание основных закономерностей воздействия этих условий на гидродинамику таких объектов. Развитие методов математического моделирования и компьютерных технологий позволяет проводить их исследования на основе данных вычислительного эксперимента, что и будет сделано в рамках предлагаемой статьи.

### Физико-математическая модель

Рассмотрим задачу определения гидродинамических и гидростатических сил, действующих на подводный объект, произвольным образом движущийся в известном неоднородном поле плотности при наличии внутреннего волнения и подводных течений. Движение объекта – тела корабельной формы – задано зависящими от времени  $t$  поступательной  $\vec{V}_0(t)$  и угловой  $\vec{\omega}(t)$  скоростями движения. Его положение в пространстве определяют координаты полюса объекта  $X_0 Y_0 Z_0$  в абсолютной системе  $OXYZ$ , а также углы атаки  $\alpha$  и дрейфа  $\beta$ . Начало этой системы расположено на свободной невозмущенной поверхности воды, а ось  $Y$  направлена вертикально вверх, как это показано на рис. 1.

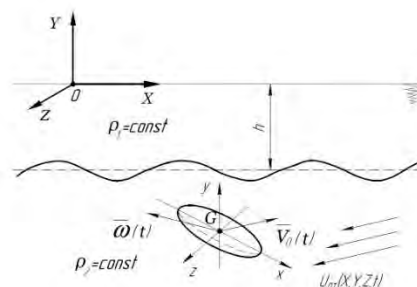


Рис. 1. Постановка задачи

Известны параметры поля скорости ВВ  $\vec{U}_{ВВ}$ , а также скорость подводного течения  $\vec{U}_{ПТ}$ . Задача заключается в определении интегральных (силовых) и распределенных гидромеханических характеристик, к которым относятся главный вектор и главный момент гидромеханических реакций, а также векторное поле скоростей жидкости и скалярное давлений.

Для описания поля плотности жидкости  $\rho$  используется двухслойная модель, в которой ее изменение происходит скачкообразно в бесконечно тонком слое (резко пикноклине), выше и ниже которого плотность постоянна. Величина этого скачка равна  $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$ , где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  плотность верхней и нижней жидкости соответственно. Нижняя жидкость – бесконечно глубокая, а более легкая верхняя – имеет глубину  $h$ .

Для разработки математической модели поставленной задачи примем в качестве основы модель прогнозирования гидродинамических характеристик твердого тела при его движении в безграничной однородной среде [2]. В ней влияние вязкости учитывается косвенно, аналогично тому, как это сделано в теории крыла: в невязкий потенциальный поток, обтекающий корпус объекта, вводится вихревая система, приближенно учитывающая воздействия завихренности пограничного слоя и следа на распределение давлений. Это позволяет определять все гидродинамические реакции за исключением сил вязкостного сопротивления и момента крена, которые формируются главным образом за счет касательных напряжений.

Вытесняющее воздействие объекта на жидкость заменим воздействием непрерывного слоя источников с неизвестной интенсивностью  $q$ , расположенных на его поверхности  $S$ . Для ее нахождения используется граничное интегральное уравнение (ГИУ) типа Фредгольма второго рода, выражающего граничное условие непротекания на этой поверхности

$$2\pi q(P) + \int_S q(Q) \frac{\vec{r} \cdot \vec{n}}{r^3} dS = (\vec{V}_0 + \vec{\omega} \times \vec{r}_0 - \vec{U}_{ВВ} - \vec{U}_{ПТ}) \cdot \vec{n}(P)$$

В этом уравнении  $\vec{r}_0$  – радиус-вектор контрольной точки  $P \in S$ , в которой выполняется условие непротекания, относительно начала координат связанной с подводным объектом системы (полюса),  $\vec{r} = |\overline{QP}|$  – радиус-вектор, соединяющий текущую точку Q, обтекающую всю поверхность S, с точкой P,  $\vec{n}$  – орт внешней нормали к этой поверхности. Вектор  $\vec{U}_{ВИХР}$  – это вектор поля скорости, которое генерирует вихревая система корпуса, представляющая из себя полубесконечный вихревой цилиндр, начинающийся в одном из поперечных сечений объекта. Координата начала и завихренность составляющих его продольных вихрей определяются в рамках рассматриваемой модели [2].

Результаты исследований ряда авторов [1, 3, 4] показывают, что при прогнозировании силового воздействия ВВ на подводные объекты применение модели плоской прогрессивной линейной волны обеспечивает приемлемую точность получаемых результатов с ошибкой в безопасную сторону. На основании этого для расчета поля скорости  $\vec{U}_{ВВ}$  будем использовать модифицированную авторами двухслойную потенциальную модель Сретенского Л.Н. с двумя границами раздела «воздух-жидкость» и «жидкость-жидкость» [3].

После численного решения ГИУ по известным зависимостям рассчитывается поле скорости и потенциал от корпуса, с помощью интеграла Коши-Лагранжа для нестационарных течений вычисляется гидродинамическое давление, а затем – главный вектор и главный момент гидродинамических сил, действующих на подводный объект путем интегрирования этих давлений по поверхности корпуса. При этом все эти характеристики вычисляются с одновременным учетом нестационарного характера движения объекта и жидкости, внутреннего волнения, подводных течений и косвенного учета вязкости. Следовательно, гидродинамические давления и реакции определяются без использования гипотезы о независимости сил различной физической природы: инерционных, волновых и вязких. При этом модель и созданные на ее основе численный метод и компьютерная программа позволяют при необходимости исследовать вклад каждого физического фактора. Так, если исключить из правой части ГИУ поля  $\vec{U}_{ВВ}$ ,  $\vec{U}_{ВИХР}$  и  $\vec{U}_{ПТ}$ , то получим только гидродинамические реакции инерционной природы при движении объекта в однородной безграничной жидкости. Если дополнительно учесть скорости от ВВ, то будут определены так называемые инерционно-волновые реакции, а, добавив скорости от вихревой системы, – вязкие компоненты гидродинамических реакций.

**Результаты вычислительного эксперимента**

В ходе проведения масштабного вычислительного эксперимента варьировались: параметры объекта (водоизмещение, форма корпуса); параметры внутреннего волнения (амплитуда, длина волны); параметры пикноклина (разность плотностей верхней и нижней жидкостей); положение объекта по отношению к пикноклину и

свободной поверхности, параметры движения объекта (курсовой угол, угол атаки, угол дрейфа, скорость тела), а также рассматривался случай пересечения скачка плотности и движения на циркуляции. Целью эксперимента было как подтверждение адекватности предложенной модели и метода, так и выявление новых закономерностей силового воздействия натуральных гидрофизических условий на подводные объекты.

В эксперименте использовались три тестовые модели, геометрические характеристики которых представлены в таблице 1.

таблица 1

**Геометрические характеристики объектов**

Объект	Длина, м L	Диаметр, м D	Отношение L/D	Водоизмещение, м <sup>3</sup> W
M1	100	8.43	11.87	7700.2
M2	70	8.34	8.39	2902.4
M3	18.29	2.49	7.34	53.37

При исследовании влияния параметров внутреннего волнения на гидродинамические характеристики (ГДХ) объектов различного водоизмещения длина волны  $\lambda$  варьировалась в пределах от 400 до 4000 метров, амплитуда волны – от 0,5 до 10 метров. Объекты двигались прямолинейно при нулевых углах атаки и дрейфа со скоростью от 1 м/с до 4 м/с на глубине 20 метров под скачком плотности, который располагался ниже свободной поверхности на 30 метров. Плотности верхней и нижней жидкости приняты соответственно равными  $\rho_1 = 1024 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho_2 = 1026 \text{ кг/м}^3$ .

Ниже приведены основные закономерности, полученные в ходе вычислительного эксперимента.

Обнаружены эффекты, аналогичные воздействию внешних волн на объекты и подтверждающие адекватность предложенной математической модели, а именно:

- при постоянной амплитуде и длине волны наблюдается возрастание влияния ВВ по мере возрастания размеров объекта. Эта зависимость наблюдается как при сравнении размерных величин, так и безразмерных коэффициентов гидродинамических реакций, отнесенных к водоизмещению объектов. Следовательно, ВВ оказывает большее влияние на больший объект.;

- с ростом длины ВВ ее воздействие на данный объект убывает, а с ростом амплитуды – возрастает.

- силовое воздействие ВВ на объект убывает по мере удаления объекта от пикноклина.

Воздействие внутренней волны на объект зависит и от положения его по отношению к пикноклину и свободной поверхности. При нахождении объекта над пикноклином наблюдается уменьшение воздействия внутренней волны на гидродинамические характеристики объекта по сравнению с положением его под пикноклином (рис. 2). Это можно объяснить влиянием практически невозмущенной свободной поверхности, которая ограничивает скорости, вызванные внутренней волной, в верхней жидкости на подобии твердой стенки.



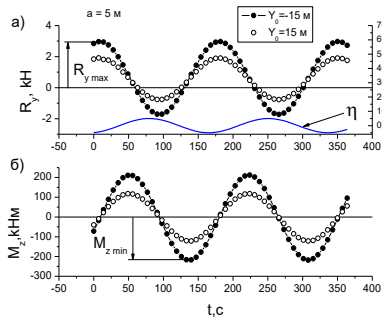


Рис. 2. Зависимость нормальной силы и момента дифферента от времени при движении M2 над и под скачком плотности навстречу волне длиной 800 и амплитудой 5 метров

При проведении численного эксперимента был обнаружен эффект противофазности изменения во времени гидродинамических реакций и внутренней волны. На графиках рисунков 2 – 5, соответствующих движению объектов M2 и M1 над и под скачком плотности навстречу внутренней волне, приведен профиль внутренней волны  $\eta(t)$ . Этот профиль соответствует точке, находящейся на середине длины корпуса. Профессором Разумеенко Ю.В. был экспериментально установлен эффект противофазности для случая неподвижного объекта [1]. Расхождение с его экспериментальными данными составляет от 4% до 13% в зависимости от геометрической формы модели и условий проведения эксперимента.

Численный эксперимент показал наличие противофазности не только на неподвижном объекте, но и на движущемся, причем в зависимости от расположения объекта. Обнаружено явление противофазности при движении объекта навстречу (рис. 2, 3) и лагом к волне (рис. 4). Важно подчеркнуть, что при попутном волнении противофазность отсутствует (рис. 5).

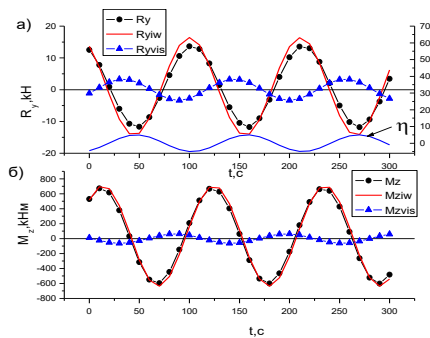


Рис. 3. Нормальная сила и момент дифферента при движении объекта M1 со скоростью 3 м/с навстречу волне амплитудой a = 5 метров, длине волны λ = 400 метров, при нулевых углах атаки, дрейфа, крена и дифферента

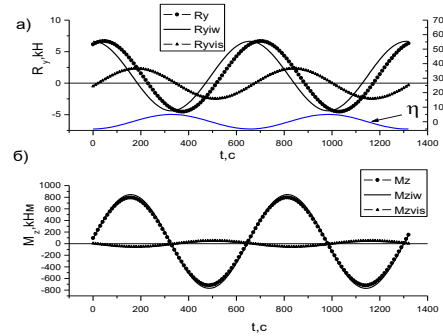


Рис. 4. Нормальная сила и момент дифферента при движении объекта M1 перпендикулярно к направлению распространения волн

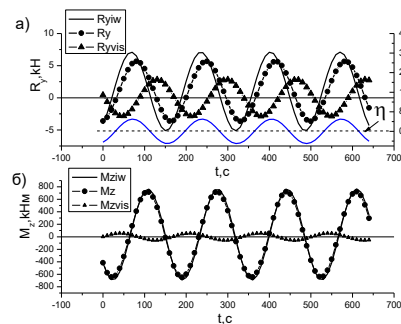


Рис. 5. Нормальная сила и момент дифферента при движении объекта M1 по направлению распространения волн

В ходе вычислительного эксперимента выявлено, что влияние ВВ на вязкие поперечные силы и моменты значительны – соответственно 20 и 9 процентов от максимальных значений аналогичных инерционно-волновых реакций, при этом инерционно-волновые и вязкие реакции сдвинуты по фазе относительно друг друга (рис. 3 – 5).

При любом направлении движения объекта над и под пикноклином возникает вертикальная «сила присоса» направленная к границе раздела плотности (рис. 3 – 5).

Обнаружено, что при движении лагом боковая сила и момент рысканья одного порядка с вертикальными силами и моментами (рис. 6).

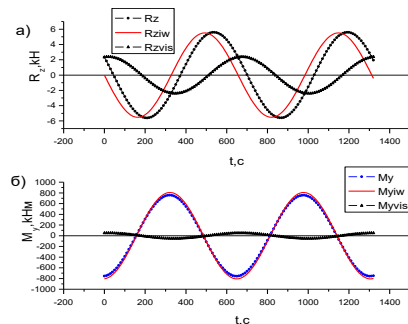


Рис. 6. Боковая сила и момент рысканья при движении объекта M1 перпендикулярно к направлению распространения волн

На рисунке 7 показано влияние ВВ на гидродинамические реакции при изменении курсового угла в пределах от 0 до 360°. Наблюдаются такие диапазоны изменения курсового угла, в которых нормальные и боковые реакции оказываются весьма близкими и могут привести к возникновению на объекте как вертикальной, так и боковой качки.

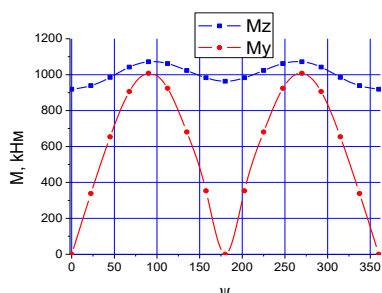


Рис. 7. Зависимость максимального по абсолютной величине момента дифферента и рысканья объекта M2 от курсового угла

Силовое воздействие на объект при всплытии (погружении) объекта через пикноклин складывается из двух составляющих – гидростатической и гидродинамической, причем первая существенно больше второй и может отличаться в несколько раз. Различие между гидростатическим и гидродинамическим моментом заметно меньше – в 1,6 раза. Гидростатические реакции изменяются плавно, а гидродинамические – знакопеременно. В области непосредственного пересечения скачка плотности наблюдается наиболее интенсивное и разнонаправленное изменение гидродинамических реакций (рис. 8).

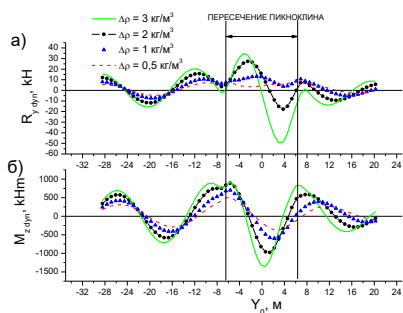


Рис. 8. Гидродинамическая нормальная сила и момент дифферента при всплытии объекта M1 через скачок плотности при различных значениях  $\Delta\rho$

Характер изменения гидродинамических реакций еще более усложняется при одновременном воздействии на объект ВВ и подводных течений. В этом случае эти реакции становятся нерегулярными функциями времени (рис. 9).

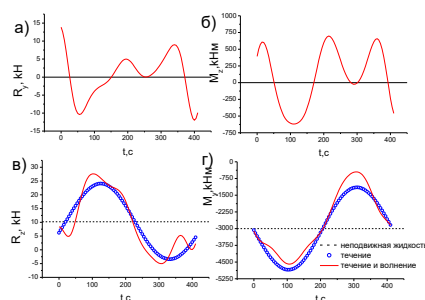


Рис. 9. Гидродинамические реакции при движении объекта M1 на циркуляции при одновременном воздействии внутреннего волнения и подводного течения

### Заключение

Результаты проведенных вычислительных экспериментов подтвердили адекватность предложенной математической модели. Были установлены новые закономерности изменения ГДХ подводных объектов при их движении в неоднородном в пространстве и во времени потоке, создаваемом подводными течениями и внутренними волнами.

Полученные результаты показывают, что изменение гидростатических и гидродинамических сил и моментов в натурной морской среде происходит по значительно более сложным законам по сравнению с однородной жидкостью. Использование полученных результатов в расчетах динамики подводных объектов позволит получить проектные и конструктивные решения, обеспечивающие требуемые мореходные качества таких объектов.

Малая вычислительная стоимость (расчет ГДХ в одном положении в зависимости от параметров расчетной сетки занимает от 1 до 4 секунд) позволяет также применять эту модель при создании тренажеров-имитаторов динамики морских объектов.

### Литература

1. Технический отчет (итоговый) о НИР по теме «Теоретические и лабораторные исследования по определению степени влияния аномальных природных факторов на подвижные морские объекты». Шифр «Аномалия-НЦ», Санкт-Петербургский Научный центр РАН, СПб., 2006.
2. Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В. Компьютерные технологии в корабельной гидродинамике. Монография. СПб., Военно-морской инженерный институт, 2010.
3. Гурьев Ю.В., Перегудин С.И., Слуцкая М.З., Ткаченко И.В., Якушенко Е.И. Компьютерное моделирование влияния реальных гидрофизических условий на гидродинамику подводных объектов// Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб.: Наука, 2012 г. 242-245 с.

4. Васильева В.В. Движение подводных объектов в стратифицированной жидкости и в поле внутренних волн. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - СПб.: СПбГМТУ, 1999.

#### References

1. Tehniceskij otchet (itogovyy) o NIR po teme «Teoreticheskie i laboratornye issledovanija po opredeleniju stepeni vlijanija anomal'nyh prirodnyh faktorov na podvizhnye morskije ob#ekty» [Theoretical and laboratory studies to determine the degree of influence of anomalous natural factors on moving marine objects]. Shifr «Anomalija-NC», Sankt-Peterburgskij Nauchnyj centr RAN, SPb., 2006.
2. Gur'ev Ju.V., Tkachenko I.V. Komp'juternye tehnologii v korabel'noj gidrodinamike [Computer technologies in ship hydrodynamics]. Monografija. SPb., Voenno-morskoj inzhenernyj institut, 2010.
3. Gur'ev Ju.V., Peregudin S.I., Sluckaja M.Z., Tkachenko I.V., Jakushenko E.I. Komp'juternoe modelirovanie vlijanija real'nyh gidrofizicheskih uslovij na gidrodinamiku podvodnyh ob#ektov [Computer modeling of the influence of real hydrophysical conditions on the hydrodynamics of underwater objects]. Trudy XI Vserossijskoj konferencii «Prikladnye tehnologii gidroakustiki i gidrofiziki». – SPb.: Nauka, 2012 g. 242-245 s.
4. Vasil'eva V.V. Dvizhenie podvodnyh ob#ektov v stratificirovannoj zhidkosti i v pole vnutrennih voln [The movement of underwater objects in a stratified fluid and in the field of internal waves]. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehniceskikh nauk. - SPb.: SPbGMTU, 1999.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Юрий Владимирович Гурьев**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики и гидромеханики, Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», 197045, Санкт-Петербург, Ушаковская набережная, 17/1, e-mail: [uvgur@mail.ru](mailto:uvgur@mail.ru)

**Мария Заурбековна Слуцкая**, преподаватель кафедры механики и гидромеханики, Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», 197045, Санкт-Петербург, Ушаковская набережная, 17/1, e-mail: [slzmarina@rambler.ru](mailto:slzmarina@rambler.ru)

**Jurij V. Gur'ev**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Mechanics and Hydromechanics, Naval Polytechnic Institute Military Educational and Scientific Center of the Naval fleet (VUNTs VMF) Naval Academy, Ushakovskaja naberezhnaja, 17/1, St. Petersburg, 197045, Russian Federation, e-mail: [uvgur@mail.ru](mailto:uvgur@mail.ru)

**Marija Z. Sluckaja**, Lecturer of the Department of Mechanics and Hydromechanics, Naval Polytechnic Institute Military Educational and Scientific Center of the Naval fleet (VUNTs VMF) Naval Academy, Ushakovskaja naberezhnaja, 17/1, St. Petersburg, 197045, Russian Federation, e-mail: [slzmarina@rambler.ru](mailto:slzmarina@rambler.ru)



УДК 532.526.2, 624.124  
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.002

## Зависимость параметров волн в битом льду от его сплоченности в условиях мелководья

В.М. Козин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук

**Аннотация.** При решении таких ледотехнических задач, как измельчение крупно-битого льда для облегчения его пропуска через гидротехнические сооружения при весенних ледоходах, разрушение ледяных заторов и зажоров в условиях мелководья, где не могут работать ледоколы из-за их осадки и пр. находят применение амфибийные суда на воздушной подушке (СВП). В работе поставлена задача оценить влияние сплоченности битого льда на скорость и длину волн в битом льду, возбуждаемых СВП при их движении в условиях мелководья со скоростями, соответствующими возникновению максимального волнового сопротивления. С этой целью в опытовом бассейне были проведены соответствующие эксперименты с использованием искусственного битого льда, изготовленного из полиэтилена высокого давления, плотность и коэффициент трения которого были близки к естественному льду. Выполненные исследования позволяют разработать наиболее эффективные приемы маневрирования СВП в условиях битого льда различной сплоченности с целью его измельчения, т.е. уменьшения размеров обломков. На основании выполненных экспериментов и анализа известных теоретических зависимостей показано, что при определении таких важных параметров гравитационных волн, как их длина и скорость распространения, возбуждаемых судном в битом льду, могут быть использованы соответствующие зависимости из теории волн на чистой воде.

**Ключевые слова:** судно на воздушной подушке, крупнобитый лед, разрушение, гравитационные волны, скорость и длина волн.

## Dependence of wave parameters in broken ice on its cohesion in shallow water

Viktor M. Kozin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

**Abstract.** When solving such ice-technical problems as crushing coarse-crushed ice to facilitate its passage through hydraulic structures during spring ice drifts, the destruction of ice jams and blockages in shallow water, where icebreakers cannot work due to precipitation, etc. amphibious vessels air cushion (SVP). The objective of the work is to assess the influence of the cohesion of broken ice on the speed and wavelength in broken ice excited by SVPs when they move in shallow water with speeds, corresponding to the occurrence of maximum wave resistance. For this purpose, corresponding experiments were carried out in the experimental pool using artificial beaten ice made of high pressure polyethylene, the density and friction coefficient of which were close to natural ice. The performed studies allow us to develop the most effective methods for maneuvering SVPs in the conditions of broken ice of various cohesion with the aim of crushing it, i.e. debris reduction. Based on the performed experiments and analysis of known theoretical dependences, it was shown that in determining important parameters of gravitational waves, such as their length and propagation velocity, excited by a vessel in broken ice, the corresponding dependences from the theory of waves in pure water can be used.

**Key words:** hovercraft, large-broken ice, destruction, gravitational waves, speed and wavelength.

### Введение

Необходимость в использовании амфибийных судов на воздушной подушке (СВП) для решения некоторых ледотехнических задач возникает в тех случаях, когда применение традиционных ледокольных средств затруднительно, а иногда и не возможно [1]. К таковым можно отнести: разрушение опасно дрейфующих льдин на мелководье, т.е. когда глубина акватории оказывается недоступной для ледоколов из-за их осадки; измельчения крупно-битого льда с целью облегчения его прохода через гидротехнические сооружения и узкие мелководные участки рек с крутыми берегами, т.е. каналы [2,3] при разрушении заторов и зажоров во время весенних ледоходов с целью предотвращения разрушительных наводнений и пр. [4]. В таких случаях следует знать, как битый лед влияет на параметры возбуждаемых судном гравитационных волн. Это позволит повысить эффективность маневрирования СВП при выполнении ледокольных работ.

### 1. Экспериментальные исследования

Битый лед, как свидетельствуют экспериментальные и теоретические исследования [5,6,7,8], оказывает определенное влияние на некоторые параметры возбуждаемых в нем волн. Многими исследователями во время наблюдений за распространением зыби в битых льдах отмечалось укорочение волны и уменьшение скорости ее распространения. В нашей работе поставлена задача оценить влияние битого льда на скорость и длину волн в битом льду, возбуждаемых СВП при их движении со скоростями, соответствующими возникновению максимального волнового сопротивления. Это связано с изучением возможности использования известных теоретических исследований для определения наиболее эффективных приемов маневрирования СВП в условиях битого льда различной сплоченности с целью его измельчения, т.е. уменьшения размеров обломков (рис. 1). Очевидно, что это может

облегчить решение некоторых ледотехнических задач, отмеченных выше.



Рис.1 Измельчение крупнобитого льда за счет повторных проходов СВП

Экспериментальных исследований влияния битого льда на параметры волн при скорости их распространения, являющейся критической, т.е. соответствующей максимальному волновому сопротивлению, а на мелководье, т.е. в речных условиях, совпадающей с резонансной для сплошного ледяного покрова [8], ранее не проводилось. Нас интересуют именно эти значения скоростей, т.к. волны в битом льду за судном являются вынужденными колебаниями, вследствие чего они перемещаются с его скоростью.

Исследование этого вопроса в натуральных условиях с естественным битым льдом различной сплоченности весьма трудоемко, поэтому эксперименты проводились в опытовом бассейне. Для экспериментов использовался искусственный битый лед, изготовленный из полиэтилена высокого давления, плотность и коэффициент трения которого были близки к естественному льду [9]. Размеры плиток льда составляли 8x8x2 см, а глубина бассейна -  $H = 17$  см. Двухмерные волны возбуждались пластинчатым волнопродуктором с частотой, являющейся критической (или резонансной в условиях мелководья [8]) для сплошного льда, лежащего на слое воды толщиной  $(a + H)$  (где  $a$  равнялась толщине модельного льда, т.е. толщине плиток). Поскольку волны генерировались в условиях мелкой воды, то критическая скорость равнялась скорости распространения свободных гравитационных волн в бассейне, что позволяло для их возбуждения использовать обычный волнопродуктор, колеблющийся с собственной частотой этих волн.

Параметры волн в битом льду различной сплоченности фиксировались при помощи фотосъемки, которая велась через специально

установленный в опытовом бассейне прозрачный борт и с помощью размеченной сетки на стенке бассейна (рис.2). Результаты обработки фотоснимков показали, что при изменении сплоченности льда от 10 до 0 баллов длина волн и скорость их распространения практически не изменялись. Существенное влияние сплоченный битый лед оказывал только на амплитуду волн (рис.3) и интенсивность их затухания (рис.4), что подтверждено и теоретическими исследованиями [10].

Незначительное влияние битого льда на длину волны подтвердили и визуальные наблюдения за СВП "Вояжер" [11]. Так, по мнению наблюдателей, за судном, разрушающим лед, перемещалась волна длиной около 20 м (рис.5), тогда как теоретическое значение длины волны для аналогичных условий составляет 22,5 м.

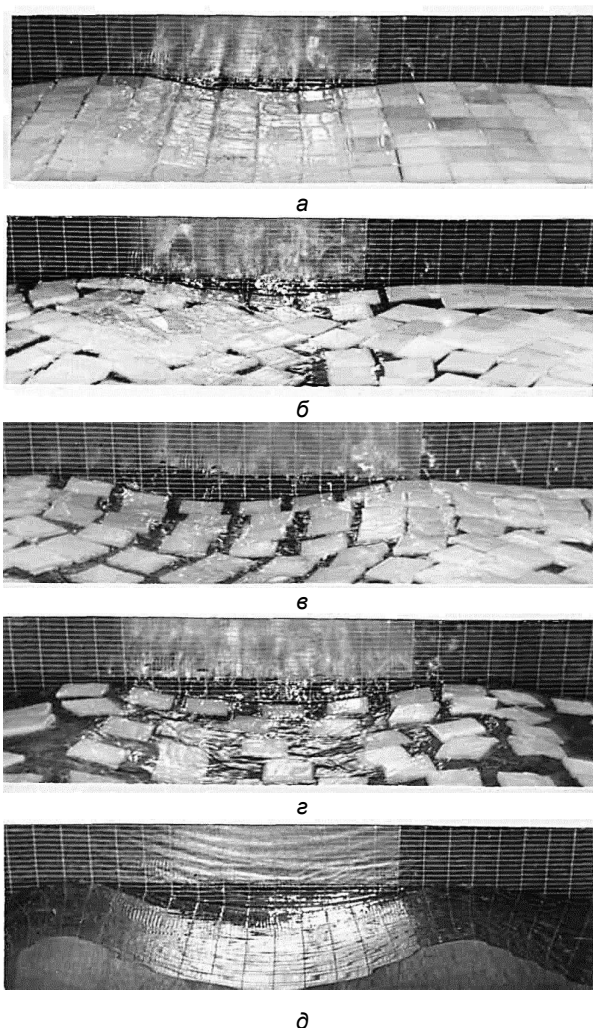


Рис.2 Зависимость параметров волн от сплоченности битого льда: а - десять баллов; б - восемь баллов; в - шесть баллов; г - четыре балла; д - ноль баллов

## 2. Анализ теоретических зависимостей

Наиболее интересным для поставленной в работе задачи является случай, соответствующий исследованиям параметров волн в десятибалльном льду. Поэтому принимаемые для сравнительно простого математического описания волновых процессов такие допущения, как предположения о сплошности, однородности и изотропности области, покрытой битым льдом, являются вполне справедливыми [12]. Действительно, битый лед за судном имеет сплоченность 10 баллов, одну и ту же толщину и примерно одинаковую в разных направлениях протяженность обломков. С учетом таких предположений в работе [8] приведены зависимости длины волны  $\lambda$  в битом льду, фазовой скорости волны  $v_0$  от ее частоты  $\omega$  и частоты собственных колебаний обломков льда  $\omega_B$  толщиной  $h$  около положения статического равновесия.

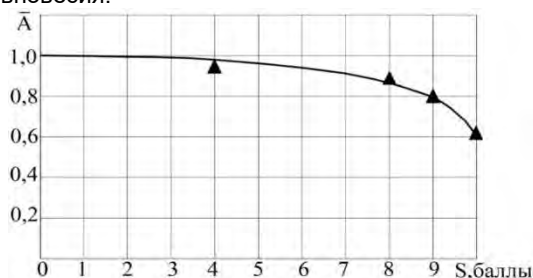


Рис.3 Значение относительных амплитуд через 2 сек. после момента возбуждения волн в зависимости от сплоченности битого льда S

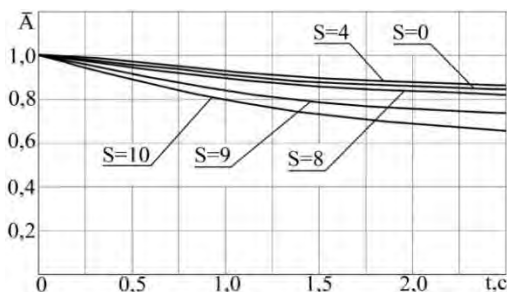


Рис.4 Зависимость интенсивности затухания (относительной амплитуды) волн от сплоченности льда

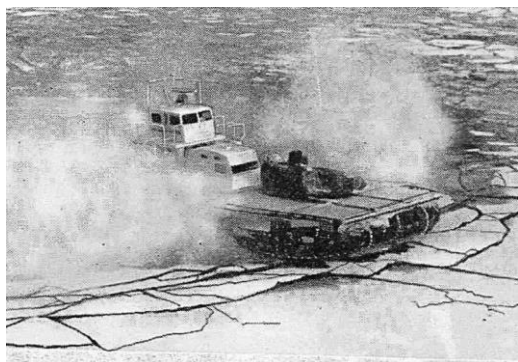


Рис. 5 Измельчение крупнобитого льда за счет повторных проходов СВП

Для случая мелкой воды, когда  $K(a + H) \ll 1$ :

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{2\pi}{\omega} \sqrt{g(a+H)} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_B}\right)^2} \\ v_0 &= \sqrt{g(a+H)} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_B}\right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\omega_B = \sqrt{\frac{\rho_B g}{\rho_L h}}$ ,  $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ .

Для глубокой воды, когда  $K(a + H) \gg 1$ :

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{2\pi g}{\omega^2} \left[ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_B}\right)^2 \right] \\ v_0 &= \frac{g}{\omega} \left[ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_B}\right)^2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Как видно из формул (1) и (2), при частотах  $\omega \ll \omega_B$ , соответствующим волнам значительной длины или малым толщинам льда, выражения для  $\lambda$  и  $v_0$  будут незначительно отличаться от известных формул для волн малой амплитуды на свободной поверхности воды. Оценим эти отличия. Принимая во внимание интересующие нас толщины ледяного покрова, глубину воды и соответствующие этим величинам значения резонансных скоростей, определим возможный интервал изменения значений  $\omega/\omega_B$ . Так как периоды ИГВ для интересующих нас толщин льда лежат в пределах 5-20 сек, а соответствующие им частоты  $\omega$  в пределах 1,26 – 0,31 сек<sup>-1</sup>, то для толщины льда 0,2 – 1,5 м получаем, что значения  $\omega/\omega_B$  лежат в пределах 0,1 – 0,2. Из этого следует, что скорость и длина волны во льду сплоченностью 10 баллов уменьшаются по сравнению с чистой водой примерно на 5 %.

Таким образом, и экспериментально и теоретически показано незначительное влияние битого льда на длину и скорость волны. Это дает основание без существенной погрешности определить длину волн в битом льду за движущимся СВП по формулам для чистой воды.

Для бесконечной глубины бассейна:

$$v^2 = \frac{gh}{2\pi} \quad (3)$$

где  $v$  - скорость СВП.

Для конечной глубины бассейна

$$v = \sqrt{\frac{gh}{2\pi} \tanh \frac{2\pi H}{\lambda}} \quad (4)$$



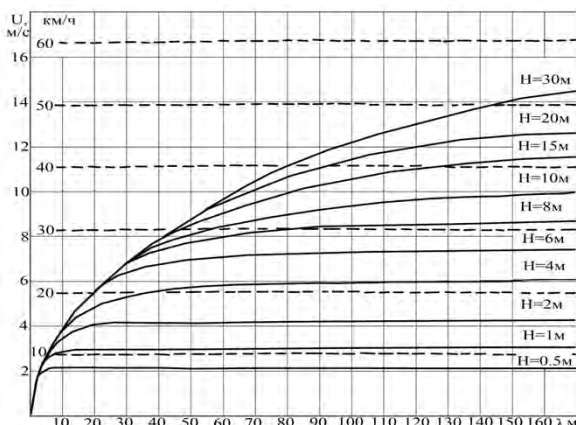


Рис. 6 Зависимость длины волны на свободной поверхности воды от скорости ее распространения и глубины акватории

Результаты расчетов по формулам (3) и (4) представлены на рис. 6.

## Заключение

Полученные результаты будут полезными, когда для повышения интенсивности процесса измельчения льда, т.е. для сокращения времени выполнения ледокольных работ, возникнет необходимость использовать одновременно несколько СВП, движущихся кильватерным строем [13] на расстоянии друг от друга, равном длине гравитационной волны, определенной по рис. 6. На таком расстоянии между судами будет происходить благоприятная, с точки зрения увеличения суммарной амплитуды, интерференция возбуждаемых в битом льду гравитационных волн. Кроме того, показано, что при решении ледотехнических задач с помощью СВП для определения критических (горбовых [14]) скоростей судна в битом льду в конкретных ледовых условиях можно использовать теоретические зависимости для условий чистой воды.

Работа выполнена в рамках гос. задания № 075-01032-20-00.

## Литература

1. Ионов Б.П., Грамузов Е.М., Зуев В.А. Проектирование ледоколов. СПб.: Судостроение, 2013. 512 с. ISBN 978-57355-0784-2
2. Завьялова К.Н., Шишмарев К.А., Хабахпашева Т.И. Движение внешней нагрузки по битому льду в канале. Известия АлТГУ. Математика и механика. 2018. № 4 (102). С. 73-78.
3. Завьялова К.Н., Шишмарев К.А., Хабахпашева Т.И. Движение внешней нагрузки по битому льду в канале. Известия АлТГУ. Математика и механика. 2018. № 4 (102). С. 73-78.
4. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. СПб.: Судостроение, 2013. 504 с. ISBN 5-7355-0779-6
5. Букатов А.Е. Волны в море с плавающим ледяным покровом. Севастополь: ФГБУН МГИ. 2017, 360 с.
6. Доценко С.Ф. О влиянии битого льда на развитие корабельных волн // Морские гидрофизические исследования. Севастополь: изд-во МГУ АН УССР, 1977, №2 (77), с.35-40.
7. Козин В.М. Результаты испытаний модели речных ледоколов в битых льдах на мелководье // Теория и прочность ледокольного корабля. Горький: Изд. ГПИ им.А.А.Жданова, 1980, вып.2, с.30-33.
8. Хейсин Д.Е. Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1967.216 с.
9. Зуев В.А., Рабинович М.Е. Моделирование ледовой среды при экспериментальных исследованиях движения судна в битых льдах. Труды / ГПИ. Горький: Изд. ГПИ им.А.А.Жданова, 1967, т.23, вып.9, с.43-50.
10. Марченко А.В., Чумаков М.М. Исследование затухания поверхностных гравитационных волн в прикромочной зоне дрейфующего льда Баренцева моря // Вести газовой науки. 2017. № 4 (32). С. 94-103.
11. Козин В.М., Земляк В.Л. Физические основы разрушения ледяного покрова резонансным методом. Комсомольск-на-Амуре: ИМИМ ДВО РАН, ПГУ им. Шолом-Алейхема, АмГПГУ.2013, 250с.
12. Распространение поверхностных волн в ледовых условиях / Букатов А.Е., Букатов А.А., Жарков В.В., Завьялов Д.Д. Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ. 2019. – 204 с. ISBN 978-9908460-7-4
13. Экспериментально-теоретические исследования зависимости параметров распространяющихся в плавающей пластине изгибно-гравитационных волн от условий их возбуждения / В.М.Козин [и др.], под общ. ред. В.М. Козина. Приамур. гос. ун-т им. Шолом-Алейхема, Амурск. гум.-пед. гос. ун-т, Ин-т машиноведения и металлургии ДВО РАН. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2016. – 222 с. ISBN 978-5-7962-
14. Войткунский Я.И. Сопrotивление движению судов: Учебник. – 2-е изд., доп. и перераб. – Л.: Судостроение. 1988, 288 с.

## References

1. Ionov B.P., Gramuzov E.M., Zuev V.A. Proektirovanie ledokolov. [Design of icebreakers]. S.- Peterburg, 2013. 512 s. ISBN 978-57355-0784-2.
2. Zavyalova K.N., Shishmarev K.A. Ob odnoi zadashе dvizheniy bneshnei nagruzki po vyaizkomu bitomu ldu v kanale. [About one problem of the movement of an external load on viscous broken ice in a channel]. Izvestiy AITGU. Matematika I mehanika. 2019.No 4 (108), ss. 76-84.
3. Zavyalova K.N., Shishmarev K.A., Xabahpasheva T.I. Dvigenie vneshney nagruzki po bitomu ldu v kanale [The movement of the external load on the broken ice in the channel]. ]. Izvestiy AITGU. Matematika I mehanika. 2018. No. 4 (102), ss. 73-78.
4. Ionov B.P., Gramuzov E.M. Ledovaj xodkost sudov [Ship ice speed]. S.- Peterburg, 2013. 504 s. ISBN ISBN 5-7355-0779-6.
5. Bukatov A.E. Volni v more s plavayshim ledyanim pokrovom [Waves in the sea with floating ice cover]. Sevastopol: FGBUN MGI. 2017, 360 s.
6. Dozenko S.V. O vlijnii bitogo lyda na razvitie korabelnih voln [On the effect of broken ice on the development of ship waves]. Morskie gidrofizicheskie issledovaniy. Sevastopol: izd-vo MGU AN USSR. 1977, No. 2 (77), ss. 35-40.



- 7 Kozin V.M. Rezltatij ispijtaniy modeli reshnyih ledokolov v bitijh Idax na melkovode [Test results of the model of river icebreakers in broken ice in shallow water]. Teorij I proshnost ledokolnogo korablj. Gorki: Izd. GPI im. A.A. Shdanova. 1980, issue 2, ss. 30-33.
- 8 Heysin D.E. Dinamika ledjnogo pokrova [Dynamics of ice cover]. L.: Gidrometeoizdat, 1967. 216 s.
- 9 Zuev V.A., Rabinovich M.E. Modelirovanie ledovoj sredij pri eksperimentalnyh issledjvanih dvigenij sudna v bitijh Idax [Modeling of the ice environment in experimental studies of ship motion in broken ice. Proceedings]. Trudij / GPI im. A.A. Zhdanova, 1967, t. 23, vjip. 9, ss. 43-50.
- 10 Marshenko A.V., Shumakov M.M. Issledovanie zatushanij poverxnostnyih gravitacionnyh voln v prikrumoshnoj zone dreyfujshogo Ida Barenzovogo morj [Investigation of the attenuation of surface gravitational waves in the marginal zone of drifting ice in the Barents Sea]. Vesti gazovoj nauki. 2017. No. 4 (32), ss. 94-103.
- 11 Kozin V.M., Zemlyk V.L. Fizisheskie osnovy razrushenij ledjnogo pokrova rezonansnim metodom [The physical basis of ice cover destruction by the resonance method]. Komsomolsk-na-Amure: IMiM DVO RAN, PGU im. Sholem Aleichem, AmGPGU. 2013, 250 s.
- 12 Rasprostranenie poverxnostnyih voln v ledovih uslovijh [Propagation of surface waves in ice conditions]. Bukatov A.E., Bukatov A.A., Zharkov V.V., Zavialov D.D. Sevastopol: FGBUN FIT MGI. 2019. 204 s. ISBN 978-9908460-7-4.
- 13 Eksperimentalno-teoretisheskie issledovanij zavisimosti parametrov rasprostranjshijsj v plavajshy plastine izgibno-gravitacionnyih voln ot usloviy ih vozbushdenij [Experimental and theoretical studies of the dependence of the parameters of flexural-gravitational waves propagating in a floating plate on the conditions of their excitation]. V.M. Kozin [I dr.], Pod obshei redakciej V.M. Kozina. Amur. Gos. Universitet im. Sholem Aleichem, Amursk. gum.-ped. gos. universitet, Institut Mashinovedenij I metallurgii DVO RAN. 2016. 222 s. ISBN 978-5-7962-1504-9.
- 14 Voitkunski Y.I. Soprotivlenie dvigeniy sudov [Resistance to Ship Movement]. Ushebnyk. – 2-e izd. Dop. I pererab. - L.: Sudostroenie. 1988, 288 s.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Козин Виктор Михайлович**, доктор технических наук, профессор по кафедре кораблестроения, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, 681005, Комсомольск-на-Амуре, ул. Metallургов 1, e-mail: kozinvictor@rambler.ru

**Viktor M. Kozin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Shipbuilding Department, Chief Researcher of the Laboratory of Problems of Creation and Processing of Materials and Products, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 681005, Komsomolsk-on-Amur, 1 Metallurgov st., e-mail: kozinvictor@rambler.ru

УДК 629.5.016:001.892  
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.036

## Анализ возможных соотношений плотностей потока у корпуса модели и её движителя по выражениям для оценки параметров пропульсивного комплекса при масштабном моделировании ходкости судов с использованием самоходных моделей (в порядке обсуждения)

П.А. Бимбереков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет водного транспорта

**Аннотация.** Моделирование пропульсивных характеристик судов с использованием малых самоходных моделей в опытовых бассейнах производится исходя из подобия чисел Фруда, при этом обеспечить подобие по числу Рейнольдса не удаётся. В связи с не полным моделированием параметров как потока обтекающего корпус модели, так и потока набегающего на её винт, возникает гидродинамическое несоответствие сил сопротивления самоходной модели и упора её движителя при масштабной скорости, обеспечиваемой буксировочной тележкой. Таким образом, моделирование сопряжено с рядом масштабных погрешностей, нейтрализация которых как в физическом исполнении, так и посредством введения расчётных поправок является важной задачей.

Рассматривается возможность организации у корпуса и движителя самоходной модели потоков разной плотности для нейтрализации некоторых видов масштабных погрешностей. Для анализа выбрана зависимость пересчёта с модели на натуру, использующая поправочные коэффициенты в виде степенной функции масштаба для корпуса и движителя модели. Получены зависимости взаимосвязи плотностей обтекающего корпус и набегающего на гребной винт потоков в оговариваемых вариантах соотношения степеней пересчёта с модели на натурное судно. Намечаются подходы к практической реализации рассматриваемой задачи изменения натекающих потоков, обтекающих корпус и движитель самоходной модели, связанные с отсосом и подачей жидкости.

**Ключевые слова:** пропульсивный комплекс, движитель, потоки разной плотности, масштабные эффекты, опытовый бассейн, модельный эксперимент, самоходные испытания.

## Analysis of possible ratios of flux density at the shell model and its propeller in the expressions to evaluate parameters of propulsion complex at scale modeling propulsion of ships using self-propelled models

Pavel A. Bimberekov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian State University of Water Transport

**Abstract.** Simulation of propulsive characteristics of vessels using small self-propelled models in the experimental pools is based on the similarity of Froude numbers, while it is not possible to provide similarity in the Reynolds number. Due to the incomplete modeling of the parameters of both the flow around the body of the model and the flow incident on its screw, there is a hydrodynamic mismatch of the resistance forces of the self-propelled model and the emphasis of its propulsion at the scale speed provided by the towing cart. Thus, the simulation involves a number of large-scale errors, the neutralization of which both in physical performance and through the introduction of computational corrections is an important task.

The possibility of organization of self-propelled model of flows of different density for neutralization of some types of scale errors is considered. For the analysis, the dependence of the conversion from model to nature, using the correction factors in the form of a power function of the scale of the model for the body and the engine of the model, was chosen. The dependences of the relationship of the densities streams around the hull and the propeller streams to be specified embodiments, the ratio of the degree of recalculate dependencies of the model of the hull and propeller to full-scale vessel. Approaches to the practical implementation of the considered problem of changing the flowing flows around the hull and the self-propelled propulsion associated with the suction and supply of liquid are outlined.

**Keywords:** propulsion complex, propulsion, flows of different density, scale effects, experimental pool, model experiment, self-propelled tests.

### Введение

При проведении самоходных модельных испытаний судов в опытовом бассейне обеспечивают частичное подобие натурным судам включающее полное соответствие критерию Фруда при обязательном условии превышения критического значения числа Рейнольдса для получения удовлетворительного результата [1-6]. При этом неизбежно возникают гидродинамические масштабные эффекты, связанные с изменением коэффициентов сопротивления, как корпуса, так и винта модели по сравнению с натурным судном.

Коэффициент нагрузки винта, обтекаемого измененным попутным потоком корпуса модели по сравнению с натурным судном больше. Нейтрализация этого неравенства является важнейшим в методике моделирования и определении коэффициентов взаимодействия движителя с корпусом.

**Цель и методика исследования.** Произвести оценку возможности нейтрализации масштабных эффектов самоходных модельных испытаний посредством корректировки натекающих потоков на корпус и движитель самоходной модели. Оценка взаимовлияния потоков обтекающих корпус и

двигатель самоходной модели производится с использованием выражений статьи [7] включающих поправочные коэффициенты в виде степенной функции масштаба для корпуса и двигателя модели. Кроме того ставится дополнительная задача наметить подходы к практической реализации рассматриваемого вопроса изменения натекающих потоков у корпуса и двигателя самоходной модели.

**Построение общих выражений**

В статье [7] в частности получено равенство представляющее соотношение идеализированных коэффициентов упора натурального судна,  $K_{TH}(J_{H1})$ , и модели,  $K_{TM}(J_{M1})$ , двигающейся с масштабной по числу Фруда скоростью  $V_M$ :

$$1 \equiv \frac{K_{TH}(J_{H1})}{K_{TM}(J_{M1})} = \left( 1 + \frac{\Delta K_{TM}(J_{M1})}{K_{TM}(J_{M1})} \right) \frac{\left( 1 + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1}) \right)}{(\rho_H / \rho_M) M^{3-\theta \epsilon(J_{M1})}} = \left( 1 + \frac{\Delta K_{TM}(J_{M1})}{K_{TM}(J_{M1})} \right) \frac{\left( 1 + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M) \right)}{(\rho_H / \rho_M) M^{3-\theta(V_M)}} \frac{i_{TM}(V_M) [1-t_M(V_M)]}{i_{TH}(V_H) [1-t_H(V_H)]}, \tag{1}$$

где  $\Delta K_{TM}(J_{M1}) = K_{TM}(J_{M1}) - K_{TM}(J_{H1})$  – фактическая разница между коэффициентами упора модели при поступе винта за её корпусом  $J_{M1}$  и поступью винта за натурным судном  $J_{H1}$ ;  $J_{H1} = J_H [1 - W_{TH}(J_H)]$  и  $J_{M1} = J_M [1 - W_{TM}(J_M)]$  – относительная поступь винта соответственно для природы и самоходной модели с учётом попутного потока с коэффициентами  $W_{TH}(J_H)$  и  $W_{TM}(J_M)$  при скоростях движения  $V_H$  и  $V_M$ ;  $T_{M0}(V_{BM})$  – идеализированный без масштабных эффектов упор модели винта в свободной воде при скорости равной скорости подобного натуре набегающего на винт потока самоходной модели,  $V_{BM}$ , т.е. с учётом попутного потока её корпуса;  $\sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi}$  – сумма  $m$  поправок к упору модели винта (винтов) в свободной воде;  $\rho_H$  и  $\rho_M$  – плотность потока природы и модели соответственно;  $J = V/(nD)$  – относительная поступь винта с подстрочными индексами «н» и «м» у природы и модели соответственно;  $M$  – степень уменьшения модели;  $\theta(V_M)$  – показатель степени у степени уменьшения модели,  $M$ , при пересчёте сопротивления корпуса самоходной модели на природу с введением коэффициента засасывания через сопротивление несамходной модели при скорости движения самоходной модели  $V_M$ ;  $\theta \epsilon(J_{M1})$  – показатель степени у степени уменьшения модели,  $M$ , при пересчёте упора с модели винта самоходной модели на природу, через эквивалентный винт модели в свободной воде с учётом попутного потока корпуса самоходной модели,  $W_{TM}(J_M)$ , или что тоже при поступе эквивалентного винта модели в свободной воде величиной  $J_{M1}$ ;  $R_{MC}$  – идеализированное сопротивление несамходной модели, без погрешностей, вызванных масштабными эффектами, например: от изменения коэффициента сопротивления трения корпуса; отклонения от полного геометрического подобия, в частности, отсутствия некоторых источников сопротивления

природы, таких как выступающие части – кронштейны, скуловые кили и т.д., присутствия дополнительных источников сопротивления и/или источников влияющих на сопротивление, например, вследствие установки специальных турбулизаторов, отсоса и подачи жидкости (возможно с изменёнными характеристиками относительно внешнего потока) в отдельных местах наружной обшивки испытываемой модели и т.д.; изменения ускорения сил тяжести; параметров набегающего потока, в частности, плотности, вязкости, предварительной

турбулизованности, наличия взвесей и т.д.;  $\sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi}$  – сумма  $n$  поправок к сопротивлению несамходной модели, вызванная масштабными эффектами, например, вследствие установки специальных турбулизаторов, изменения параметров среды испытаний (вязкости, плотности, давления), изменения ускорения сил тяжести, возможно, от отклонения от геометрического подобия модели и т.д., в частности включает усилие  $R_A$ , компенсирующее изменение коэффициента сопротивления модели по сравнению соответственным коэффициентом у натурального судна;  $i_{TH}(V_H)$  и  $i_{TM}(V_M)$  – значения коэффициентов влияния неравномерности потока на упор двигателя в попутном потоке от корпуса судна для природы и модели соответственно при скоростях движения  $V_H$  и  $V_M$ , которые при идеализированном случае (при отсутствии масштабных эффектов) должны быть равны;  $t_H(V_H)$  и  $t_M(V_M)$  – коэффициенты засасывания соответственно у природы и модели при скоростях движения  $V_H$  и  $V_M$ .

Исходя из (1) придём к двум равенствам для поправки к коэффициенту упора модели,  $\Delta K_{TM}(J_{M1})$ :

$$\frac{\Delta K_{TM}(J_{M1})}{K_{TM}(J_{H1})} = \frac{(\rho_H / \rho_M) M^{3-\theta \epsilon(J_{M1})}}{\left( 1 + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1}) \right)} - 1, \tag{2}$$

$$\frac{\Delta K_{TM}(J_{M1})}{K_{TM}(J_{H1})} = \frac{(\rho_H / \rho_M) M^{3-\theta(V_M)}}{\left( 1 + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M) \right)} \frac{i_{TH}(V_H) [1-t_H(V_H)]}{i_{TM}(V_M) [1-t_M(V_M)]} - 1. \tag{3}$$

Из (1) и (2) получим:

$$1 = \frac{K_{TH}(J_{H1})}{K_{TM}(J_{H1})} = \frac{M^{\theta(V_M)}}{M^{\theta(J_{M1})}} \frac{\left(1 + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M)\right) i_{TM}(V_M) [1 - t_M(V_M)]}{\left(1 + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1})\right) i_{TH}(V_H) [1 - t_H(V_H)]}. \quad (4)$$

Равенство (4) представляет собой соотношение масштабных эффектов, возникающих при моделировании натурального самоходного судна масштабной самоходной моделью при одинаковой плотности обтекающего корпус и натекающего на движитель модели потока. При этом фиксируемое динамометрией буксировочной тележки усилие, обеспечивающее движение самоходной модели с масштабной скоростью должно быть также учтено.

Возьмём в рассмотрение из системы равенств (18) работы [7] искомые значения коэффициента упора винта за корпусом, эквивалентного упора и коэффициента упора винта в свободной воде у натурального судна и её предпоследнее равенство, преимущественно характеризующее самоходную модель при масштабной скорости по числу Фруда:

$$\begin{aligned} K_{ТВН} &= \frac{T_{НС}}{\rho_H n_H^2 D_H^4} = \frac{T_H(J_{H1}) i_{TH}(V_H)}{\rho_H n_H^2 D_H^4} = K_{TH}(J_{H1}) i_{TH}(V_H) = \\ &= \frac{T_{M0}(J_{M1}) \left(1 + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1})\right) i_{TM}(V_M) M^{\theta(J_{M1})}}{\rho_M (\rho_H / \rho_M) n_M^2 D_M^4 M^3} \frac{i_{TH}(V_H)}{i_{TM}(V_M)} = \\ &= \frac{-R_{MC}(V_M) \left(1 + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M)\right) M^{\theta(V_M)} / [1 - t_M(V_M)]}{\rho_M (\rho_H / \rho_M) n_M^2 D_M^4 M^3} \frac{[1 - t_M(V_M)]}{[1 - t_H(V_H)]}. \end{aligned} \quad (5)$$

Учитывая зависимость идеализированных, т.е. без масштабных эффектов упора и сопротивления самоходной модели в режиме самохода  $T_{M0}(J_{M1}) = -R_{MC}(V_M) / [1 - t_M(V_M)]$  допустим оговоренную выше возможность организовать потоки разной плотности вокруг корпуса модели и её винта с соответственными значениями величиной  $\rho_{M1}$  и  $\rho_{M2}$ . Следуя этому из предпоследнего равенства

выражения (5) взяв во внимание прямо пропорциональное изменение тяги винта и сопротивления модели от плотности среды, в которой они работают, т.е. равенство коэффициентов упора и коэффициентов сопротивления при разных плотностях среды, получим равенство, позволяющее варьировать значением результирующих поправок к действующим силам - относительным сопротивлению модели и упору винта:

$$\frac{\left(1 + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1})\right)}{(\rho_H / \rho_{M2}) M^{3 - \theta(J_{M1})}} = \frac{\left(1 + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M)\right) i_{TM}(V_M) [1 - t_M(V_M)]}{(\rho_H / \rho_{M1}) M^{3 - \theta(V_M)} i_{TH}(V_H) [1 - t_H(V_H)]}. \quad (6)$$

Из (6), выразив  $\rho_{M2}$  и  $\theta(J_{M1})$ , соответственно получим:

$$\rho_{M2} = \rho_{M1} \frac{\left(1 + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M)\right) i_{TM}(V_M) [1 - t_M(V_M)] M^{\theta(V_M) - \theta(J_{M1})}}{\left(1 + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1})\right) i_{TH}(V_H) [1 - t_H(V_H)]}. \quad (7)$$

$$\theta(J_{M1}) = \theta(V_M) - \frac{1}{\lg M} \lg \left[ \frac{\left(1 + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1})\right) \rho_{M2} i_{TH}(V_H) [1 - t_H(V_H)]}{\left(1 + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M)\right) \rho_{M1} i_{TM}(V_M) [1 - t_M(V_M)]} \right]. \quad (8)$$

В частном случае, когда имеет место равенство  $\theta(J_{M1}) = \theta(V_M)$  из (8), получим выражение для соотношения плотности потока в зоне действия её винта и на поверхности корпуса модели

$$\rho_{M2} = \rho_{M1} \frac{\left(1 + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M)\right) i_{TM}(V_M) [1 - t_M(V_M)]}{\left(1 + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1})\right) i_{TH}(V_H) [1 - t_H(V_H)]}. \quad (9)$$

При использовании, как это принято в отечественной практике, равенства у модели и натуре коэффициентов засасывания и неравномерности потока в диске винта выражение (9) упростится:

$$\rho_{M2} = \rho_{M1} \left( 1 + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M) \right) / \left( 1 + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1}) \right). \quad (10)$$

В условиях режима самохода модели, т.е. равенства упора винта и сопротивления самоходной модели, из равенства (5) получим зависимость для соотношения плотностей потока у винта и на корпусе

$$\frac{M^{\theta_{\epsilon}} i_{TH}(V_H)}{(\rho_H/\rho_{M2}) i_{TM}(V_M)} = \frac{M^{\theta(V_M)} [1-t_M(V_M)]}{(\rho_H/\rho_{M1}) [1-t_H(V_H)]} \Rightarrow \rho_{M2} = \rho_{M1} M^{[\theta(V_M)-\theta_{\epsilon}(J_{M1})]} \frac{[1-t_M(V_M)] i_{TM}(V_M)}{[1-t_H(V_H)] i_{TH}(V_H)}. \quad (11)$$

При наличии у модели и натуре равенства коэффициентов засасывания и неравномерности потока в диске винта выражение (11) упрощается

$$\rho_{M2} = \rho_{M1} M^{[\theta(V_M)-\theta_{\epsilon}(J_{M1})]}. \quad (12)$$

В частном случае, когда имеет место равенство  $\theta_{\epsilon}(J_{M1}) = \theta(V_M)$  из (12), получим тривиальное для существующей экспериментальной практики соотношение плотности потока в зоне действия её винта и на поверхности корпуса модели  $\rho_{M2} = \rho_{M1}$ .

При частном случае, когда имеет место равенство  $\theta_{\epsilon}(J_{M1}) = \theta(V_M)$ , а у модели и натуре нет равенства

коэффициентов засасывания и неравномерности потока в диске винта из выражения (11), получим следующее соотношение плотности потока в зоне действия её винта и на поверхности корпуса модели

$$\rho_{M2} = \rho_{M1} \frac{[1-t_M(V_M)] i_{TM}(V_M)}{[1-t_H(V_H)] i_{TH}(V_H)}. \quad (13)$$

Выразив из зависимости (5) коэффициенты упора натурального судна и модели с учётом разной плотности набегающего потока на корпус и движитель модели, имея в виду, что  $K_{TM}(J_{M1}) = T_{M0}(J_{M1}) / (\rho_M n_M^2 D_M^4)$ , получим систему равенств:

$$\left\{ \begin{aligned} K_{ТВН} &= \frac{T_{HC}}{\rho_H n_H^2 D_H^4} = \frac{T_H(J_{H1}) i_{TH}(V_H)}{\rho_H n_H^2 D_H^4} = K_{TH}(J_{H1}) i_{TH}(V_H) = \\ &= K_{TM}(J_{M1}) i_{TM}(V_M) \frac{\left( 1 + \sum_{i=1}^m \Delta T_{Mi} / T_{M0}(J_{M1}) \right) M^{\theta_{\epsilon}(J_{M1})}}{(\rho_H/\rho_{M2}) M^3} \frac{i_{TH}(V_H)}{i_{TM}(V_M)}, \\ K_{ТВН} &= \frac{T_{HC}}{\rho_H n_H^2 D_H^4} = K_{TH}(J_{H1}) i_{TH}(V_H) = \frac{-R_H(V_H) / [1-t_H(V_H)]}{\rho_H n_H^2 D_H^4} = \\ &= K_{TM}(J_{M1}) i_{TM}(V_M) \frac{\left( 1 + \sum_{i=1}^n \Delta R_{Mi} / R_{MC}(V_M) \right) M^{\theta(V_M)}}{(\rho_H/\rho_{M1}) M^3} \frac{[1-t_M(V_M)]}{[1-t_H(V_H)]}. \end{aligned} \right. \quad (14)$$

Значения  $\theta_{\epsilon}(J_{M1})$  и  $\theta(V_M)$  легко определяются из модельного эксперимента соответственно модели винта в свободной воде и несамходной модели корпуса судна, все с использованием обычного пересчёта значений сопротивления с модели на натуру. Конечно, желательно иметь линейку моделей типовых винтов разного диаметра с заранее известными, экспериментально установленными значениями натуральных и модельных параметров. Другие составляющие правых частей равенств (14) за исключением последних дробей могут быть получены из модельных исследований известными способами. Коэффициенты взаимодействия с корпусом ( $W_{TM}(J_M)$  и  $t_M(V_M)$ ) у самоходной модели определяется достаточно точно для винтов близкого диаметра при различных прочих геометрических параметрах [1, С.86]. Коэффициент неравномерности, как упора, так и момента винта обсуждается [5, С.178,180,181,184], в отечественной практике он, как правило, принимается равным единице. Как нам представляется, он может быть практически оценен при достаточной частоте замеров значений упора винта самоходной модели, существенно превышающим частоту вращения винта. При этом можно рекомендовать отдельное крепление через динамометрию движителя от модели для независимой фиксации действующих сил на движителе и корпусе модели. В итоге на основе (14), при принятии из дополнительных соображений значений последних дробей равенств, получаем

вариант пересчёта параметров движителей с модели на натуру при определении из модельного эксперимента с натекающими потоками постоянной или разной плотности параметров правой части равенств.

Попробуем оценочно наметить подходы практической реализации изменения плотности набегающего потока на движители. Вполне очевидно, что изменение параметров потока около корпуса модели и набегающего на её движитель может быть достигнуто отсосом и закачкой жидкости [6, С.269], [8]. Так отсос жидкости в пограничном слое модели позволит уменьшить его толщину, т.е. привести в большее соответствие натурному обтеканию. Подача жидкости в зону действия движителя, с увеличенной скоростью набегающего потока, снизит его упор. При этом повышение плотности подаваемой в зону действия движителя жидкости позволит увеличить его упор. Отсос жидкости, вероятно, целесообразно начать ближе к кормовой оконечности модели для того, чтобы не ламинаризовать течение в пограничном слое. Подачу жидкости с изменёнными характеристиками (плотности, вязкости, скорости) также очевидно придётся производить перед и/или непосредственно в область работы винта модели. Идеализировано можно допустить существование некоторого экрана, устанавливаемого примерно нормально к обшивке, вероятно имеющего самостоятельное, без контакта с моделью крепление. Сторона такого экрана, обращённая в нос судна, является приёмником потока, а противоположная сторона является



источником потока с изменёнными свойствами, включая распределение скоростей.

Отметим, что любые меры, принимаемые для искусственной коррекции потоков жидкости, будут вносить свои масштабные эффекты, которые в свою очередь также возможно потребуются компенсировать.

### Заключение

Получены выражения связывающие значения плотностей обтекающего корпус и набегающего на гребной винт потоков в оговариваемых вариантах соотношения степеней пересчёта с модели на натуре корпуса и движителя. Дана система выражений позволяющая произвести пересчёт результатов модельного эксперимента на натурное судно с

использованием поправочных коэффициентов в виде степенной функции масштаба модели для корпуса и движителя модели допускающая учёт изменения плотностей обтекающего корпус и набегающего на гребной винт потоков. Представлены суждения по подходам практической реализации рассматриваемой задачи изменения натекающих потоков, обтекающих корпус и движитель самоходной модели, связанные с отсосом и подачей жидкости, изменением плотности и распределения скоростей. Возможность и справедливость высказанных суждений автор выносит на рассмотрение научной общественности, надеясь на обсуждение и подключение специалистов с изобретательским мышлением.

### Литература

1. *Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А.* Судовые движители : учебник. Л.: Судостроение, 1988. – 296 с.
2. *Эпштейн Л.А.* Методы теории размерностей и подобия в задачах гидромеханики судов. Л.: Судостроение, 1970. – 207 с.
3. *Ван-Ламмерен, Троост, Кони́нг.* [Lammeren W.P.A., Troost L., Koning J.G.]. Сопротивление, пропульсивные качества и управляемость судов: перевод с англ. Д.В. Дорогостайского, под ред. Ю.В. Кривцова и Г.А. Фирсова. Л.: Гос. союз. изд-во судпром, 1957. – 387 с.
4. *Базилевский Ю.С.* Исследование пропульсивных характеристик судов в опытовом бассейне. СПб.: Политехника, 2008. – 229 с.
5. *Маннинг Дж., Давидсон К., Шоенхер К.* [Manning G.C., Davidson K.S.M., Schoenherr K.E.] Основы корабельной архитектуры: перевод с англ. Д.В. Дорогостайского, под ред. Ю.В. Кривцова и Г.А. Фирсова. Т.2. Л.: Гос.из-во судостр. лит-ры, 1949. – 279 с.
6. *Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / Под ред. Я.И. Войткунского.* Л.: Судостроение, 1985. – 768 с.
7. *Бимбереков П.А.* Вариант выражений для оценки параметров пропульсивного комплекса при масштабном моделировании ходкости с использованием самоходных моделей с движителем гребной винт. Морские интеллектуальные технологии. №3(45), Т.1, 2019. – С.11-17.
8. *Басин А.М., Короткин А.И., Козлов Л.Ф.* Управление пограничным слоем судна (основные проблемы). Л.: Судостроение, 1968. – 492 с.

### References

1. *Artyushkov L.S., Achkinadze A.SH., Rusetskiy A.A.* Sudovye dvizhiteli [Ship propulsion]: uchebnik. L.: Sudostroenie, 1988. 296 p.
2. *Ehpshteyn L.A.* Metody teorii razmernostey i podobiya v zadachakh gidromekhaniki sudov [Methods of the theory of dimensions and similarities in problems of hydromechanics of ships]. L.: Sudostroenie, 1970. 207 p.
3. *Van-Lammeren, Troost, Koning.* [Lammeren W.P.A., Troost L., Koning J.G.]. Soprotivlenie, propul'sivnye kachestva i upravlyaemost' sudov [Resistance, propulsion and steering of ships]: perevod s angl. D.V. Dorogostayskogo, pod red. YU.V. Krivtsova i G.A. Firsova. L.: Gos. soyuz. izd-vo sudprom, 1957. 387 p.
4. *Bazilevskiy YU.S.* Issledovanie propul'sivnykh kharakteristik sudov v opytovom basseyne [The study of propulsive characteristics of ships in the experimental pool]. SPb.: Politehnika, 2008. 229 p.
5. *Manning Dzh., Davidson K., Shoenkher K.* [Manning G.C., Davidson K.S.M., Schoenherr K.E.] Osnovy korabel'noy arkhitektury [Principles of naval architecture]: perevod s angl. D.V. Dorogostayskogo, pod red. YU.V. Krivtsova i G.A. Firsova. T.2. L.: Gos.iz-vo sudostr. lit-ry, 1949. 279 p.
6. *Spravochnik po teorii korablya [Ship Theory Handbook]: V trekh tomakh. Tom 1. Gidromekhanika. Soprotivlenie dvizheniyu sudov. Sudovye dvizhiteli / Pod red. YA.I. Voytkunskogo.* L.: Sudostroenie, 1985. – 768 p.
7. *Bimberekov P.A.* Variant vyrazhenij dlya ocenki parametrov propul'sivnogo kompleksa pri masshtabnom modelirovanii hodkosti s ispol'zovaniem samohodnykh modelej s dvizhitelem grebnoj vint [A variant of expressions for estimating of propulsion complex parameters during scale modeling of the vessels using self-propelled models with a ship propeller propulsor]. Morskie intellektual'nye tekhnologii. №3(45), T.1, 2019. pp. 11-17.
8. *Basin A. M., Korotkin A. I., Kozlov L. F.* Upravlenie pogranichnym sloem sudna (osnovnye problemy) [Management of the boundary layer of the vessel (main problems)]. L.: Sudostroenie, 1968. 492 p.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Павел Александрович Бимбереков**, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры Теории корабля, судостроения и технологии материалов, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: bimberekov@yandex.ru

**Pavel A. Bimberekov**, Dr. Sci. (Eng.), Assistant professor, Assistant professor of the Department of theory of ship, shipbuilding and technology of materials, Siberian state University of water transport, 630099, Novosibirsk, Schetinkina, 33, Russian Federation, e-mail: bimberekov@yandex.ru

УДК 629.5.015.4  
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.037

## Анализ упругопластического деформирования балок с присоединенным пояском МКЭ

А.И. Притыкин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Калининградский государственный технический университет

<sup>2</sup>Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта

**Аннотация.** Для оценки несущей способности балок судовых конструкций надо определять их предельную нагрузку. Существующие расчетные зависимости, приводимые в справочных изданиях, далеко не всегда дают верные рекомендации, когда речь идет о балках с присоединенным пояском обшивки, который может намного превосходить размер свободного пояса. В работе проведен сравнительный анализ оценки предельной нагрузки, определяемой аналитически и путем упругопластического расчета методом конечных элементов с варьированием ширины присоединенного пояса. Рассматривался вариант упругопластического нагружения с линейным упрочнением. Полученные результаты показали, что приводимая в справочнике по СМК, зависимость для оценки предельной нагрузки балок с асимметричным профилем не совсем корректна из-за неполного включения присоединенного пояса в работу. Это дает завышенные значения предельной нагрузки. Проверены были также рекомендации по оценке прогибов балок в предельном состоянии, показавшие, что рекомендации справочника по СМК приводят к заниженным значениям прогибов. Для балок симметричного профиля расчетные зависимости справочника дают вполне удовлетворительные результаты. Отмечено, что если поперечная нагрузка вызывает текучесть стенки балки от сдвига, то влияние ширины присоединенного пояса практически не сказывается на ее несущей способности. Проанализировано также влияние величины секущего модуля на предельную нагрузку балки.

**Ключевые слова:** балка, предельная нагрузка, несимметричный двутавр, пластический шарнир, напряжения, прогибы, аналитический расчет, МКЭ

## Analysis by FEM of elasto-plastic deformation of beams with associated plate

Alexej I. Pritykin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Kaliningrad State Technical University

<sup>2</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University

**Abstracts.** For estimation of load capacity of the ship beams it is necessary to determine their limit load. Existing analytical relations, indicated in different manuals, not always give true recommendations when talk is about beams with associated plate many times exceeding dimensions of free flange. In this paper fulfilled comparative analysis of limit load, determined with analytical and elastic-plastic calculation by the finite element method. It was considered case of elastic-plastic deformation with lineal strain-hardening. Obtained results show that indicated in manual on the ship structural mechanics, relation for estimation of limit load of non-symmetric I-beams is not quite correct because of not complete inclusion of associated plate to the beam deformation. This lead to overestimation of limit loads. It was also shown that recommendations on evaluation of the deflections of beams in elastic-plastic deformations according to mentioned manual lead to much lower values of deflections. For beam with symmetric profile the relations of manual give quite satisfactory results. It was noticed, that if transverse load produces the yielding of web due to shear the influence of width of associated plate has no influence on the load capacity of beam. It was also analyzed influence of value of the strain-hardening modulus on limit load of beam.

**Key words:** limit load, non-symmetric I-beam, plastic hinge, stress, deflections, analytic calculation, FEM

### Введение

При швартовках судов в открытом море происходят навалы, приводящие иногда к остаточным деформациям шпангоутов. Несущую способность шпангоута можно определить с помощью анализа его предельного состояния. Аналитическое исследование несущей способности балочных конструкций находит отражение в работах Е.М. Апполонова [1, 2], в справочнике Л.М. Беленького [3], в источниках [4-12] и ряде других. Большинство балок судовых конструкций являются компонентами перекрытий и имеют присоединенные пояски, приводящие к асимметричной по высоте форме сечения. Наиболее полно вопросы несущей способности балок асимметричного профиля теоретически исследованы в работах [1, 3]. При аналитическом расчете [1, 3, 4] предполагается, что сечение балки полностью участвует в восприятии внешней нагрузки, на основании чего и строятся

расчетные зависимости. Однако численные расчеты предельной нагрузки таких балок демонстрируют существенное отклонение от подобных допущений. Наиболее достоверную оценку несущей способности балок асимметричного профиля может дать метод конечных элементов.

Целью работы явилась проверка с помощью расчетов МКЭ рекомендаций, приведенных в справочнике по СМК [4], по оценке предельных нагрузок балок асимметричного профиля при действии равномерно распределенной нагрузки  $q$ , а также рекомендаций по определению прогибов статически неопределимых балок в упругопластической стадии нагружения.

Отметим, что обычный анализ МКЭ напряженно-деформированного состояния балки для определения ее предельной нагрузки в случае идеального упругопластического материала с диаграммой напряжений, изображенной на рис.1а, непосредственно не применим. Объясняется это тем, что процедуры, основанные на предельном

анализе, становятся нестабильными, когда прикладываемая нагрузка приближается к предельной. Косвенно предельная нагрузка балки может быть определена МКЭ для варианта упрочненного материала с линейным упрочнением (рис.1б). Такой подход приемлем, если предельная нагрузка, рассматриваемая как критерий прочности, ассоциируется с прогибом, возникающим в конструкции.

Кривая на рис.1б может быть аппроксимирована ломаной линией, состоящей из двух участков: линии 1-2, представляющей упругую стадию с модулем Юнга  $E = tg\alpha$ , и линии 2-3 с углом наклона  $\alpha_1$ , соответствующем модулю упрочнения  $E_t = tg\alpha_1$ .

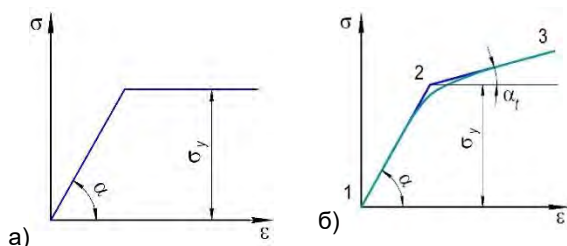


Рис.1. Диаграммы напряжений упругопластического материала: а/ идеального; б/ с линейным упрочнением

В качестве предельной рассматривается нагрузка, вызывающая образование пластических шарниров в расчетных сечениях. Отметим, что предельная нагрузка  $q_T$  будет зависеть от величины модуля  $E_t$ , определяющего степень неравномерности развития пластических деформаций по высоте балки. Чем меньше величина модуля  $E_t$ , тем ближе будет распределение напряжений в сечении к прямоугольному.

**1. Методика оценки предельной нагрузки двутавровой балки**

При поперечном изгибе переход сечения в пластическое состояние обусловлен как перерезывающей силой  $V$ , так и изгибающим моментом  $M$ . При переходе сечения в предельное состояние от изгиба предельный момент балки определяется как

$$M_T = \sigma_T W_T, \tag{1}$$

где  $W_T$  - предельный момент сопротивления сечения;  $\sigma_T$  - предел текучести материала при растяжении.

Если текучесть сечения вызвана деформацией сдвига, обусловленной перерезывающей силой  $V$ , то ее предельная величина  $V_T$  будет

$$V_T = \tau_T A_w, \tag{2}$$

где  $A_w$  - площадь стенки;  $\tau_T = \sigma_T / \sqrt{3}$  - предел текучести материала при сдвиге.

При совместном действии  $\sigma$  и  $\tau$  предельное состояние наступит, если соотношение действующих напряжений удовлетворяет условию пластичности. Как отмечено в [1], наибольшее сходство теоретических решений и экспериментов для судостроительных сталей обеспечивает критерий

Мизеса. Поэтому в дальнейших расчетах МКЭ наступление текучести будем определять по эквивалентным напряжениям по Мизесу. В отличие от теоретических исследований, вводящих те или иные допущения, расчеты МКЭ интегрально учитывают влияние на несущую способность балки всех факторов.

Для сравнительного анализа будем рассматривать балки симметричного (рис.2а) и асимметричного профиля (рис.2б). Примем обозначения размеров балок  $l - h_w - t_w - b_f - t_f - b_o - t_o$ , как указано на рис.2.

Для симметричного двутаврового сечения величина  $W_T^{симм}$  определяется как [4]

$$W_T^{симм} = h_w^2 t_w (0.25 + \varphi), \tag{3}$$

$$\text{где } \varphi = b_f t_f / h_w t_w.$$

Для асимметричного профиля с присоединенным пояском величина  $W_T^{асим}$  имеет вид [4]

$$W_T^{асим} \approx S' - (2A' - A)^2 / 4t_w, \text{ при } A' \geq A/2 \tag{4}$$

$$\text{или } W_T^{асим} \approx S', \text{ при } A' < A/2 \tag{5}$$

В выражениях (4) и (5) величины  $A'$  и  $A$  - площадь профиля без присоединенного пояса и полная площадь сечения соответственно;  $S'$  - статический момент площади  $A'$ , вычисленный относительно оси присоединенного пояса.

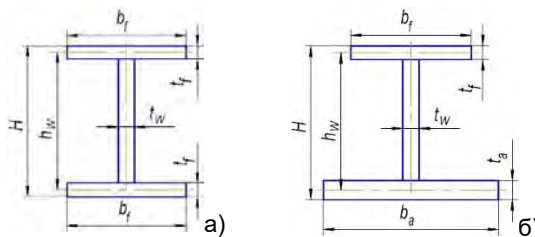


Рис.2. Форма сечения и параметры профиля: а/ симметричного; б/ асимметричного

$$A' = h_w t_w + b_f t_f; \quad A = h_w t_w + b_f t_f + b_o t_o; \tag{6}$$

$$S' \approx h_w^2 t_w / 2 + b_f t_f h_w. \tag{7}$$

Подставляя выражения (3), (4) или (5) в (1), получим величину предельного момента  $M_T$ .

Дальнейшая связь  $M_T$  с предельной нагрузкой  $q_T$  будет зависеть от способа опирания балки.

В общем случае зависимость для предельной нагрузки  $q_T$  будет иметь вид

$$q_T = k_q \sigma_T W_T / l^2, \tag{8}$$

где  $k_q$  - числовой коэффициент, зависящий от условий опирания балки и характера нагружения.

Для шарнирно опертой балки симметричного профиля при равномерно распределенной нагрузке  $k_q = 8$ , что при подстановке в (8) дает

$$q_T = 8 \sigma_T h_w^2 t_w (0.25 + \varphi) / l^2. \tag{9}$$

Для жестко защемленной с двух сторон балки при той же нагрузке при образовании 3-х шарниров: у опор и посередине пролета,  $k_q = 16$  [3], а при 2-х пластических шарнирах только вблизи опор  $k_q = 12$ . Величины моментов сопротивления  $W_T$  будут подставляться в (8) в зависимости от вида сечения. Перейдем теперь к проверке указанных соотношений расчетами МКЭ.

**2. Результаты расчетов и дискуссия**

Для шарнирно опертой (ш. о.) балки симметричного профиля размерами 150-15-0.4-5-0.6см предельная величина  $q_T$  согласно (9) с учетом равна

$$q_T = 8 \cdot 240 \cdot 150^2 \cdot 4(0.25 + 50 \cdot 6 / (150 \cdot 4) / 1500^2) = 57.6 \text{ кН/м} \quad (10)$$

Расчет МКЭ (рис.3а) приводит к значению  $q_{T,ш.о}^{МКЭ} = 62.2 \text{ кН/м}$ , что указывает на расхождение с аналитической величиной (10) в 7.4%. Столь существенное расхождение объясняется как наличием упрочнения материала, так и различием в критерии напряжений. Если в зависимости (8) в качестве предела текучести принято напряжение  $\sigma_T$ , то в МКЭ принято эквивалентное напряжение по Мизесу.

К тому же эпюра напряжений в расчетном сечении (посередине пролета) имеет вид двух трапеций, а не прямоугольников, как это предполагается при выводе формулы (9). При расчете МКЭ значение модуля упрочнения было принято равным  $E_t = 0.005E$ . Распределение напряжений показано на рис.3а.



Рис.3. Предельное состояние ш. о. балки при нагрузке  $q$ : а/  $E_t/E = 0.005E$ ; б/  $E_t/E = 0.0025E$

Уменьшение модуля упрочнения до величины  $E_t = 0.0025E$  привело к более корректному результату предельного значения  $q_T = 58.5 \text{ кН/м}$  (рис.3б), указывающему на расхождение с (10) менее чем на 1.6%.

Проделанный выше расчет можно считать тарировочным, показавшим удовлетворительную работу программы ANSYS при использовании конечных элементов типа shell63 и shell43 в

упругопластической стадии нагружения. Размер конечных элементов принимался равным  $\Delta_{кЭ} \approx 0.13H$  ( $H$  – высота балки).

Для случая жесткой заделки (ж. з.) балки предельная нагрузка ее 150-15-0.4-5-0.6 см в варианте образования трех пластических шарниров ( $E_t = 0.0025E$ ) согласно (8) с  $k_q = 16$  возрастает в 2 раза до  $q_{T,ж.з} = 115.2 \text{ кН/м}$ . Расчет же, произведенный МКЭ (рис.4), показывает увеличение предельной нагрузки до  $q_{T,ж.з}^{МКЭ} = 120 \text{ кН/м}$ , что приводит к расхождению с теоретическим значением в 4%.

Причиной расхождения служит различие в величинах

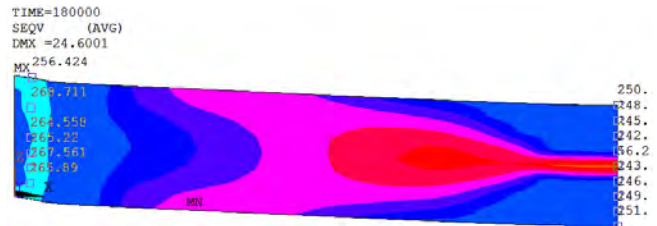


Рис.4. Предельное состояние ж.з. балки 150-15.6-0.4-5-0.6см при распределенной нагрузке  $q$

напряжений: в заделках они составляют  $\sigma_{max} \approx 266 \text{ МПа}$ , а посередине пролета (правое сечение)  $\sigma_{max} \approx 250 \text{ МПа}$ , в то время как в аналитической оценке (8) предполагается уровень  $\sigma_T \approx 240 \text{ МПа}$ . При расчете МКЭ достичь этого невозможно из-за наличия эффекта упрочнения. Даже при таком упрочнении часть волокон вблизи нейтральной оси сечения посередине пролета остается в упругой стадии нагружения (рис.4).

Получив удовлетворительные результаты на балках симметричного двутавра, перейдем к рассмотрению предельных нагрузок балок асимметричного профиля.

Именно балки такого профиля с присоединенным пояском участвуют в работе судовых перекрытий.

В качестве примера рассмотрим ж. з. балку размерами 240-40-1.2-14-1.4-40-1.4см (рис.5). Для указанной балки при последовательном увеличении распределенной нагрузки первоначально наблюдается образование пластических шарниров в районе опорных сечений (рис.5а). Учитывая параметры сечения

$$A' = 400 \cdot 12 + 140 \cdot 14 = 6760 \text{ мм}^2;$$

$$A = 6760 + 400 \cdot 14 = 12360 \text{ мм}^2;$$

$$S' \approx 174400 \text{ мм}^3,$$

предельный момент сопротивления будет равен

$$W_T^{асим} \approx S' - (2A' - A)^2 / 4t_w = 1716000 \text{ мм}^3. \quad (11)$$

Предельная нагрузка  $q_T^{асим}$  согласно (8) с учетом (4) будет равна

$$q_T^{асим} \approx 12 \cdot 240 \cdot 1716 \cdot 10^3 / 2400^2 = 858 \text{ кН/м}. \quad (12)$$



Полная предельная нагрузка  $Q_T^{асим} = q_T^{асим} l$  составит величину  $Q_T^{асим} \approx 858 \cdot 2.4 = 2059 \text{ кН}$ . (13)

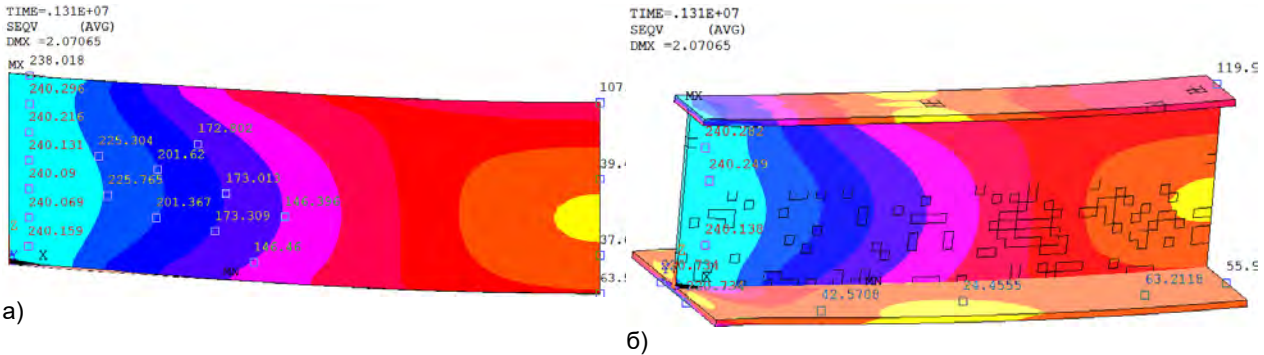


Рис.5. Распределение напряжений в ж. з. балке 240–40–1.2–14–1.4–40–1.4 см при нагрузке  $Q_T^{асим} = q_T l = 1310 \text{ кН}$  : а/ в стенке; б/ в полках

Расчет этой же асимметричной жестко защемленной балки МКЭ приводит к значению предельной нагрузки  $Q_T^{асим} \approx 1310 \text{ кН}$  (рис.5а). Здесь модуль упругости принят равным  $E_i = 0.001E$ ; модуль Юнга  $E = 210 \text{ ГПа}$ ;  $\sigma_T = 240 \text{ МПа}$ .

Расчет МКЭ показал, что при образовании пластических шарниров только в опорных сечениях (рис.5а) величина предельной нагрузки существенно ниже полученной по аналитической зависимости (8) с учетом (4). Причиной такого расхождения является неполное включение присоединенного пояска в процесс пластического деформирования. Даже когда вся стенка вблизи опоры перешла в пластическое состояние, наружная обшивка (присоединенный поясок) находится частично в упругой стадии с достаточно низким уровнем напряжений (рис.5б).

Отметим, что ширина присоединенного пояска была принята равной 1/6 длины балки в соответствии с рекомендациями Регистра [13].

Анализ влияния размера присоединенного пояска на несущую способность данной балки показал, что его увеличение, начиная от ширины свободного пояска и кончая шириной  $l/6$ , практического влияния на предельную нагрузку балки при образовании только двух пластических шарниров на опорах не оказывает. Объясняется это тем, что предельная нагрузка при принятых размерах стенки 40–1.2 см вызывает ее текучесть от касательных напряжений, а поскольку размеры стенки при изменении ширины присоединенного пояска остаются неизменными, то

и предельная нагрузка не растет. Действительно, в соответствии с (2)

$$V_T = 0.577 \cdot 240 \cdot 400 \cdot 12 = 665 \text{ кН}, \quad (14)$$

где принято  $\tau_T = 0.577 \cdot 240 \text{ МПа}$ .

Попытка исчерпания несущей способности балки путем увеличения распределенной нагрузки до момента образования пластического шарнира посередине пролета к особому успеху не привела, хотя касательные напряжения в этом сечении равны нулю. Причиной этого является асимметрия нейтральной линии нормальных напряжений по высоте. Когда большая часть стенки переходит в пластическое состояние, остается определенная нижняя часть, находящаяся в упругой стадии нагружения (рис.6а), включая присоединенный поясок (рис.6б). При нагрузке  $Q_T^{асим} = 1960 \text{ кН}$  эквивалентные напряжения по Мизесу в районе опор достигают величины  $\sigma_{экр} \approx 322 \text{ МПа}$  (рис.6а).

Конечно, проводить какое-то сопоставление с аналитическим расчетом, основанным на идеальном упруго-пластическом материале, уже нельзя.

Увеличив длину этой же ж. з. балки вдвое до  $l = 12H$  при которой уже существенна роль изгибающего момента, наблюдаем картину (рис.7а), показывающую, что при асимметричном профиле предельная нагрузка, полученная МКЭ, при образовании 2-х пластических шарниров составляет величину  $Q_{np}^{МКЭ} = 960 \text{ кН}$ , а расчет по (8) с учетом (4) дает  $Q_T^{асим} = 1029 \text{ кН}$ . Расхождение с МКЭ составляет 7.2%.

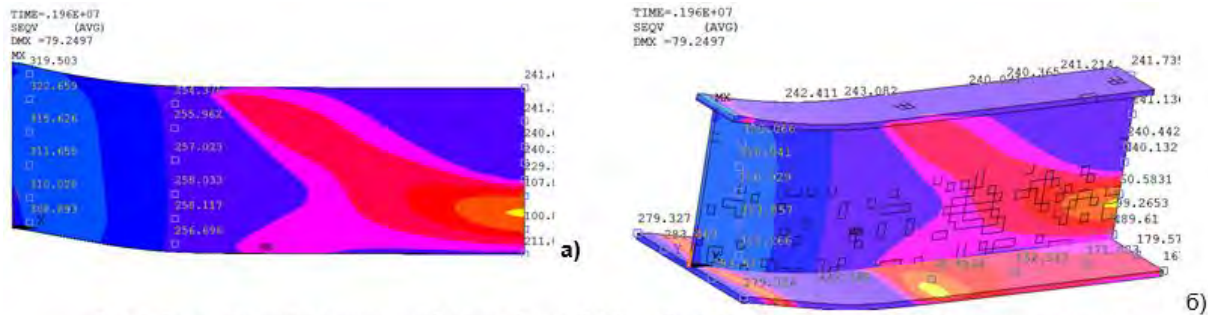


Рис.6. Распределение напряжений в ж. з. балке 240–40–1.2–14–1.4–40–1.4 см при нагрузке  $Q_T^{асим} = 1960 \text{ кН}$  с  $E_i = 0.0025E$  : а/ вид сбоку; б/ в аксонометрии

При дальнейшем нагружении до образования 3-х пластических шарниров расчет МКЭ приводит к величине предельной нагрузки  $Q_T^{МКЭ} = 1220 кН$

(рис.7б), а расчет по (8) с учетом (4) дает  $Q_T^{сум} = 1373 кН$ . Расхождение в 12.3%.



а)  $Q_T^{сум} = 960 кН$



б)  $Q_T^{сум} = 1220 кН$

Рис.7. Предельные нагрузки ж. з. балки 480–40–1.2–14–1.4–40–1.4 см асимметричного профиля при равномерно распределенной нагрузке: а/ при 2-х пластических шарнирах; б/ при 3-х шарнирах

При нагружении равномерно распределенной нагрузкой ж. з. балки симметричного профиля (рис 8а) с размерами 480–40–1.2–14–1.4 см предельная нагрузка, полученная МКЭ, при образовании 2-х пластических шарниров составляет величину  $Q_T^{МКЭ} = 793.2 кН$  (рис.8а), а расчет по (8) при коэффициенте  $k=12$  приводит к значению  $Q_T^{сум} = 758.4 кН$ . Расхождение с МКЭ составляет 4.4%. Образование трех шарниров, включая среднее сечение, достигается при величине  $Q_T^{МКЭ} = 1070 кН$

(рис.8б). При этом эквивалентные напряжения вблизи опор возрастают до 280 МПа. Расчет по зависимости (8) при  $k=16$  дает  $Q_T^{сум} = 1011.2 кН$  с расхождением от МКЭ на 5.5%. Значения предельных нагрузок по МКЭ несколько завышенные, так как имеет место упрочнение в опорных сечениях. Как видим, приведенные на рис.8 результаты МКЭ для балок симметричного профиля удовлетворительно коррелируются с расчетами по (8) с учетом (3).



а)  $Q_T^{МКЭ} = 793.2 кН$



б)  $Q_T^{МКЭ} = 1070 кН$

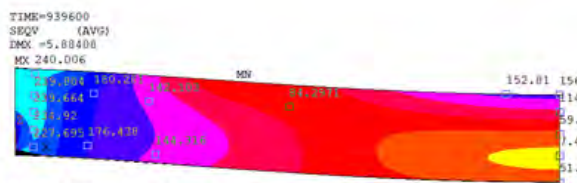
Рис.8. Предельные нагрузки ж. з. балки 480–40–1.2–14–1.4 см симметричного профиля: а/ при 2-х пластических шарнирах; б/ при 3-х шарнирах

При увеличении присоединенного пояса до 1/6 длины расчет МКЭ балки 480–40–1.2–14–1.4–80–1.4 см приводит при образовании 2-х шарниров к значению предельной нагрузки  $Q_T^{МКЭ} = 939.6 кН$  (рис.9а). Вычисления по (8) с учетом (4) дают  $Q_T^{сум} = 1046 кН$ . Расхождение в 11.3% обусловлены неполным включением в деформацию изгиба присоединенного пояса (рис.9б).

Таблица  
Расхождение  $\delta$  результатов расчета  $Q_T^{сум}$

N/N	Размеры $l-b_0$	240-40см	480-40см	480-40см	480-80см
1	Число шарниров	2	2	3	2
2	$Q_T^{сум}$ , кН	2059	1029	1373	1046
3	$Q_T^{МКЭ}$ , кН	1310	960	1220	939.6
4	$\delta$ , %	57	7.2	12.3	11.3

Ниже в таблице представлены результаты расхождения расчетов предельных нагрузок балок с асимметричным профилем по МКЭ и по (8).



а)  $Q_T^{МКЭ} = 939.6 кН$



б)  $Q_T^{МКЭ} = 939.6 кН$

Рис.9. Предельные нагрузки ж. з. балки 480–40–1.2–14–1.4–80–1.4 см несимметричного профиля при 2-х пластических шарнирах: а/ вид в плане; б/ в аксонометрии

Что касается прогибов балок в упругопластическом состоянии, то в справочнике [4] предлагается для статически неопределимой балки в предельном состоянии приближенно определять

прогиб с учетом того, что после образования пластических шарниров в районе опор балка превращается в статически определимую с шарнирным опиранием, нагруженную дополнительно

предельными моментами на опорах. Тогда максимальный прогиб согласно [4] приближенно будет равен

$$w_{\max} = \frac{5q_T l^4}{384EI} - \frac{M_T l^2}{8EI} . \quad (15)$$

Подстановка в (15) предельного значения  $q_T$  для случая образования 2-х шарниров  $q_T = 12M_T / l^2$  приведет к выражению для прогиба

$$w_{\max} = M_T l^2 / 32EI . \quad (16)$$

При размерах балки, указанных на рис.8а, вычисления по (16) приведут к значению  $w_{\max} = 4.92\text{мм}$ , а расчет по МКЭ дает  $w_{\max}^{\text{МКЭ}} = 7.93\text{мм}$ , что указывает на необходимость корректировки указанных в [4] рекомендаций. Для варианта образования 3-х шарниров предельная нагрузка будет вычисляться как  $q_T = 16M_T / l^2$ .

Подстановка этого значения  $q_T$  в (15) приведет к выражению  $w_{\max} = M_T l^2 / 12EI$ , расчет по которому дает  $w_{\max} = 13.1\text{мм}$ , в то время как по МКЭ имеем  $w_{\max}^{\text{МКЭ}} = 107.5\text{мм}$  в силу существенной текучести в опорных шарнирах (рис.8б).

### Заключение

Переход сечения в пластическое состояние при изгибе обусловлен как перерезывающей силой, так и изгибающим моментом. Если величина перерезывающей силы в сечении вызывает текучесть стенки от сдвига, то ширина присоединенного пояска практически не влияет на образование пластического шарнира.

Представленная в справочнике по СМК [4] зависимость для оценки предельной нагрузки балки асимметричного профиля приводит к ее завышенному значению, так как не учитывает неполное включение в работу балки присоединенного пояска.

Для балки симметричного профиля результаты аналитического расчета и МКЭ довольно близки, несмотря на наличие упрочнения при расчете МКЭ.

Удовлетворительную сходимость решения МКЭ можно получить даже при величине модуля упрочнения порядка  $E_t = 0.0025E$ .

Оценка прогибов в упругопластической стадии деформирования по рекомендациям справочника [4] приводит к существенно заниженным их значениям из-за неадекватного учета формы изогнутой оси балки.

### Литература

1. Апполонов Е.М., Таровик О.В. Предельные нагрузки и упругопластическое деформирование судовых балочных конструкций – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2012. 128 с.
2. Апполонов Е.М. Проектирование конструкций ледовых усилений по критерию предельной прочности // Судостроение. №2, 1992, с. 9–13.
3. Belenkiy L. Handbook on Plastic Analysis in Engineering. USA. Backbone Publishing Co., 2006. 1055p.
4. Справочник по строительной механике корабля. Т.1. /Под ред. Паляя О.М. –Судостроение. 1982.456с.
5. Дикович И.Л. Статика упругопластических балок судовых конструкций – Л.: Судостроение, 1967. 264 с.
6. Осняч А.А., Тананыкин С.В. О влиянии перерезывающих сил на предельную нагрузку балок // Сб. науч. тр. БГАРФ. Калининград, № 27. 1998, с.38–45.
7. Alsos H.S., Amdahl J. Analysis of bottom damage caused by ship grounding//Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE. 2008. V.2. Pp 829-836.
8. Liu B., Guedes Soares C. Experimental and numerical analysis of the crushing behavior of stiffened web girders //International Journal of Impact Engineering. . V.88. 2016, p.22-38.
9. Pritykin A.I. Load capacity of beam-wall with regular perforation. //Proceedings of 11th Int. Conf. «Mechanika-2006» Kaunas, 2006, p. 189-193.
10. Притыкин А.И., Притыкин И.А. Несущая способность однорядно и двухрядно перфорированных балок //Сб. научных статей международной конференции «Актуальные проблемы исследований по теории сооружений». Москва. . т.2. 2009, с.34-45.
11. Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Предельное состояние жесткопластичной балки в виде несимметричного двутавра при комбинированном нагружении // Морские интеллектуальные технологии. №2(28), т.1. 2015, с. 26–34.
12. Великанов Н.Л., Шарков О.В. Моделирование остаточных сварочных напряжений в судовых корпусных конструкциях // Морские интеллектуальные технологии. №3-4(42), 2018, с. 31–35.
13. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус / Российский Морской Регистр судоходства. – СПб.: РМРС, 2018. 209 с.

### References

1. Appolonov E.M., Tarovik O.V. Predel'nye nagruzki & uprugoplasticheskoe deformirovanie sudovyh balochnykh konstrukzij [Limit loads and elastoplastic deformation of ship beam structures]. Saint Petersburg, A.N. Krylov Central reseach institute, 2012. 128 p.
2. Appolonov E.M. Projektirovanie konstrukzij ledovyh usilenij po kriteriju predel'noj prochnosti [Design of structures of ice-strengthening on criteria of limit load]. Shipbuilding. №2. 1992, p. 9–13.
3. Belenkiy L. Handbook on Plastic Analysis in Engineering. USA Backbone Publishing Co., 2006. 1055p.
4. Spravochnik po stroitel'noj mekhanike korablia [Manual on Structural mechanics of ship]. V.1. /Under edit. of O.M. Paliy. Shipbuilding. 1982. 456p.
5. Dikovich I. L. Statika uprugo-plasticheskikh balok sudovyh konstrukcij [Statics of elastic-plastic beams of ship structures] L.: Shipbuilding. 1967. 264 p.



6. Osniach A.A., Tananykin S.V. O vlijanii pererezyvajushchyh sil na predel'nyuyu nagruzku balok [About influence of shear forces on limit load of beams] // Proceedings of BGARF. Kaliningrad, № 27. 1998, p.38–45.
7. Alsos H.S., Amdahl J. Analysis of bottom damage caused by ship grounding // Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE. 2008. V.2. Pp 829-836.
8. Liu B., Guedes Soares C. Experimental and numerical analysis of the crushing behavior of stiffened web girders. International Journal of Impact Engineering. V.88. 2016, p.22-38.
9. Pritykin A.I. Load capacity of beam-wall with regular perforation. Proceedings of 11th Int. Conf. «Mechanika-2006» Kaunas, 2006. p.189-193.
10. Pritykin A.I., Pritykin I.A. Nesushchaya sposobnost' odnoriadno & dvuhriadno perforirovannykh balok [Load capacity of single row & double row perforated beams. Proceedings of Int. Conf. «Actual problems of studies on theory of constructions»]. Moscow. v.2. 2009. p. 34-45.
11. Korshunov V.A., Ponomarev D.A., Rodionov A.A. Predel'noe sotoianie zhestkoplasticheskoy balki v vide nesimmetrichogo dvutavra pri kombinirovannom nagruzhении [Ultimate state of an asymmetric double tee stiff-plastic beam section under combined loading] Morskie intellektual'nye tekhnologii. №2(28), т.1. 2015, с. 26–34.
12. Velikanov N.L., Sharkov O.V. Modelirovanie ostatochnykh svarochnykh napryazheniy v sudovykh korpusnykh konstruktsiyakh [Modeling residual welding voltages in ship hull structures] Morskie intellektual'nye tekhnologii. V.3(4). 2018, p. 31-35.
13. Pravila Klassifikatsii i postroiки morskikh sudov [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships]. Rossiiskij morskoi registr sudokhodstva, 2019. 209 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Алексей Игоревич Притыкин**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры кораблестроения, Калининградский государственный технический университет, 236022, г. Калининград, Советский проспект, 1, e-mail: prit\_alex@mail.ru

**Alexej I. Pritykin**, Dr.Sci.(Eng), Associate professor, Professor of the Department of shipbuilding, Kaliningrad State Technical University, Russian Federation, 236022, Kaliningrad, Sovetsky av. 1, e-mail: prit\_alex@mail.ru



УДК 629.5.015.4  
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.038

## Расчет давления при динамическом контакте корпуса судна с грунтом

А.И. Мамонтов<sup>1</sup>, М.В. Китаев<sup>1</sup>, К.А. Молоков<sup>1</sup>, В.В. Новиков<sup>1</sup>, О.Э. Суров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Дальневосточный федеральный университет

**Аннотация.** При выходе судна на необорудованный берег днище корпуса касается поверхности грунта, давление грунта на корпус значительно превышает забортное давление воды. Для обеспечения безопасности эксплуатации судна следует знать величину повышенного давления, определять эксплуатационные ограничения или усиливать конструкцию днища корпуса.

Сила, действующая на днище, определяет траекторию движения носовой части корпуса. По траектории можно определить эту силу, площадь контакта, давление грунта и его свойства. Зная свойства грунта можно решить и обратную задачу: смоделировать траекторию, силу, максимальное давление и площадь контакта для более тяжелых условий швартовки. Например, при большей бальности волнения, скорости или водоизмещении определить усиления конструкций корпуса: требования к толщине наружной обшивки, размерам днищевых балок.

Давление зависит от угла наклона днища судна и характеристик морского дна, поэтому для решения поставленной задачи требуется моделировать форму носовой части и свойства грунта: плотность, коэффициент трения, угол внутреннего трения, сцепление.

Для нахождения максимального давления следует определять всю траекторию при контакте с грунтом, так как параметры движения на каждом шаге зависят от предыдущих шагов, то есть от «истории» взаимодействия корпуса с грунтом. На траекторию влияют параметры судна: форма корпуса, скорость, водоизмещение и высота волн в месте швартовки.

Корпус судна считается абсолютно жестким телом по отношению к материалу грунта. Грунт рассматривается как идеально жесткопластический материал. Упругие деформации пренебрежимо малы по сравнению с пластическими.

**Ключевые слова:** необорудованный берег, корпус судна, контакт, угол внутреннего трения, сцепление грунта, контакт корпуса с грунтом

## Dynamic contact pressure calculation of the hull with the seabed

Andrey I. Mamontov<sup>1</sup>, Maksim V. Kitaev<sup>1</sup>, Konstantin A. Molokov<sup>1</sup>, Valery V. Novikov<sup>1</sup>, Oleg E. Surov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Far Eastern Federal University

**Abstract.** When the ship beaches to an unequipped shore, the bottom of the hull contacts the seabed surface, the soil pressure on the hull is higher than water pressure. To ensure the safe beach operation of the ship, we have to know the magnitude of the high pressure, determine operational limitations or gain the hull bottom structure.

The force acting on the bottom determines the trajectory of the bow. From the trajectory, this force, contact area, soil pressure and its properties can be determined. Knowing the properties of the soil, the inverse problem can also be solved: to simulate the trajectory, force, maximum pressure and contact area for more rough mooring conditions. For example, with a greater pitching, speed or displacement, determine the reinforcement of the hull structures: requirements for the thickness of the shell, the size of the bottom beams.

Pressure depends on the angle of ship bottom inclination and the characteristics of the seabed, therefore, to solve the problem, it is necessary to simulate the shape of the bow and soil properties: density, coefficient of friction, angle of internal friction, coherence.

To find the maximum pressure, you should determine the full trajectory in contact with the seabed, since the motion parameters at each step depend on the previous steps, that is, on the "history" of the hull's interaction with the seabed. The ship's parameters influence the trajectory: hull shape, speed, displacement and wave height at the beaching point.

The hull is considered absolutely rigid body against to the material of the soil. Soil is considered as ideally rigid plastic material. Elastic deformations are negligible compared to plastic ones.

**Keywords:** unequipped shore, hull contacts, angle of internal friction, coherence, hull's interaction with the seabed.

### Введение

Вопросом расчёта прочности судов, эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт, занимались Азовцев А.И., Кулеш В.А., Огай А.С., Петров В.А. (см., например, [1]). Этих исследований недостаточно для практических потребностей, так как при эксплуатации суда касаются грунта, имея начальные горизонтальную и вертикальную скорости.

Реальная форма днища корпуса математически описывается полиномом. Точное решение зависит от этой формы и расчет давления представляет собой большие трудности. Следует заменить форму более простыми поверхностями и записать

линейный закон распределения пассивного давления для каждой.

Пассивное давление грунта – это давление, при действии которого грунт пластически деформируется и выдавливается из-под корпуса. Давление грунта на днище корпуса рассчитывается так же как пассивное давление грунта на наклонную плоскость для плоской задачи. Упругими свойствами грунта и корпуса пренебрегаем, считая их пренебрежимо малыми. Давление зависит от угла наклона плоскости и для каждой плоскости эпюра давления вычисляется отдельно.

Замена реальной поверхности днища приводит к менее трудоемкому расчету давления и универсальности: при изменении положения

плоскостей может быть задана другая форма днища.

Формула давления на плоскость состоит из двух слагаемых: первое зависит от пластических свойств грунта, второе зависит от его плотности и расстояния от поверхности грунта до точки расчёта давления. Эпюра давления представляет собой линейную функцию, возрастающую при удалении от поверхности грунта и не равную нулю на поверхности грунта.

Для определения траектории движения носовой части корпуса в работе производится интегрирование уравнений. Если сила постоянна, то задача нахождения траектории соответствует задаче движения материальной точки с начальной скоростью. В этой работе сила не постоянна и меняется в зависимости от положения корпуса относительно поверхности грунта. Уравнения движения интегрируются численно, и сила определяется итерационного на каждом шаге траектории. Значение силы на каждом шаге траектории зависит от текущей координаты, то есть от «истории» контакта корпуса с грунтом.

Представленная работа отличается от других, написанных на эту тему в соавторстве с Мамонтовым А.И., следующим:

- модель днища представлена несколькими плоскостями;
- в алгоритме расчета траектории введено контактное взаимодействие корпуса с грунтом;
- расчет траектории выполнен с начальной вертикальной скоростью (волнение в акватории).

#### Цель работы

Цель работы заключается в разработке модели взаимодействия днища корпуса судна с грунтом, отражающую следующие особенности: зависимость давления от формы днища и морского дна, параметров судна, характеристик грунта, волновых условий в акватории.

В работе объединены три модели: модель материала грунта, определяющая давление по его свойствам, модель движения носовой части, определяющая траекторию, и модель днища, определяющая его форму. Модели взаимосвязаны и влияют друг на друга. В результате давление грунта на днище корпуса оказывается зависимым от указанных выше особенностей.

#### Моделирование носовой оконечности днища корпуса судна

Носовая форма днища в нижней части корпуса может быть v-образная или u-образная, с бульбом или без него.

Исходя из этих особенностей, форма днища может быть моделирована при помощи 3-х параметров. Назовем их условно:  $\chi$ ,  $K3$  и  $k_p$ .

Рассмотрим подробно каждый параметр.

$\chi$  - параметр, характеризующий угол наклона шпангоутов.  $K3$  - параметр, характеризующий ширину горизонтального килля.

Для v-образной средний угол наклона

шпангоутов,  $\chi$ , и ширина горизонтального килля,  $K3$ , см. рис. 1, меньше, чем для u-образной.

Заостренное днище испытывает меньшее давление из-за своей формы, чем u-образное. Введение в расчет параметров  $\chi$  и  $K3$  позволяет учитывать эту особенность.

Если у судна есть бульб, то форштевень в среднем имеет более крутой подъем.  $k_p$  - параметр, характеризующий подъем форштевня. Это отношение продольных координат точки 3 и точки 2, где точка 3 – это точка пересечения диаметрального батокса с поверхностью грунта, точка 2 – это точка на основной линии судна.

Указанные параметры задают геометрию днища и влияют на давление грунта. Физический смысл этих параметров – это моделирование давления в зависимости от формы корпуса.

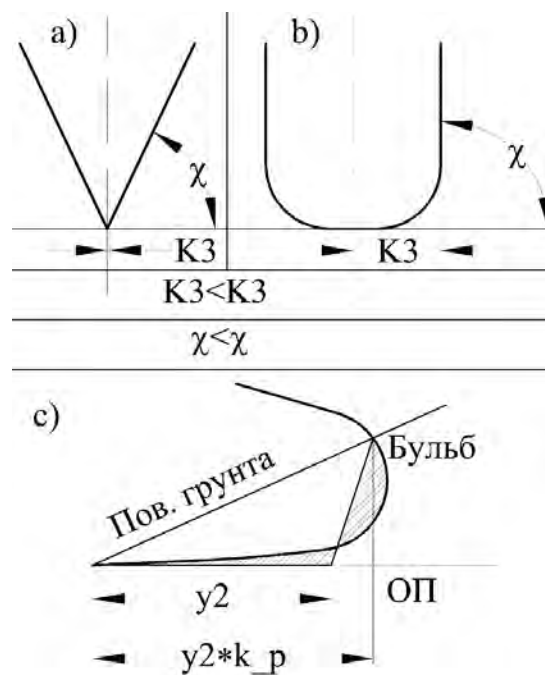


Рис. 1. Выбор параметров для моделирования формы днища корпуса судна

3-D модель носовой части днища, учитывающая все три параметра, показана на рис. 2, где дополнительно введены:  $\alpha$  – угол наклона поверхности грунта,  $\lambda$  – это половина угла наклона плоскости 2 к OXY.

Рассмотрим пример расчёта давления грунта на корпус самоходной баржи, проект 1733, тип Восток.

Правая половина носовой части СБ «Восток» показана на рис. 3, а, где зеленым показана форма корпуса, контактирующая с грунтом. На рис. 3, б зеленым показана поверхность грунта и модель днища под поверхностью грунта. Угол наклона морского дна примем  $\alpha = 20^\circ$ . Чтобы модель в наибольшей степени соответствовала форме корпуса параметры заданы так:  $K3 = 0.5\text{ м}$ ,  $\chi = 1.384\text{ рад}$ ,  $k_p = 2.6$ .

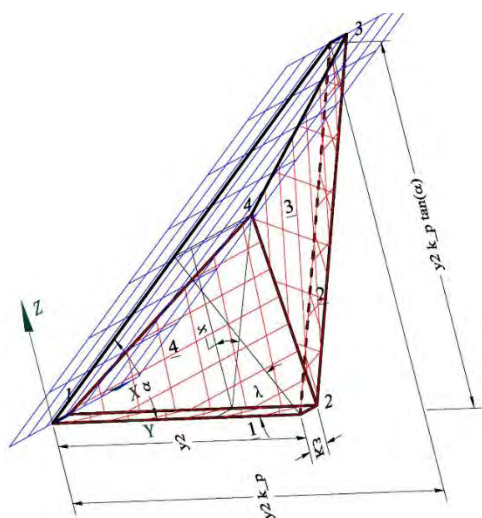


Рис. 2. 3-D модель дна, построенная по 3-м параметрам. Поверхность грунта показана синим

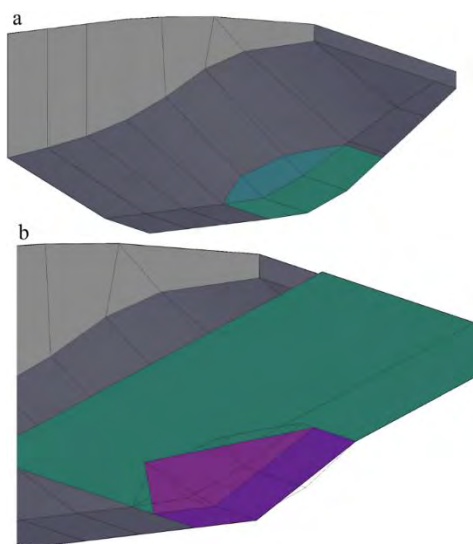


Рис. 3. а – форма пятна контакта корпуса с грунтом  
 б – результат моделирования; зеленым показана поверхность грунта

**Моделирование давления**

Расчет давления производится в рамках плоской задачи пластического предельного равновесия.

Модель материала грунта – жесткопластическое тело. До предельной нагрузки деформации тела отсутствуют, после достижения равны бесконечности. Применение такой модели оправдано тем, что в рамках рассматриваемой задачи упругие деформации грунта пренебрежимо меньше пластических.

В работе [2] представлена методика и алгоритм решения задач ударного взаимодействия корпуса судна с грунтом. Сопротивление грунта и угол в вершине клина связаны через форму вытесненного на поверхность грунта. Прочность грунта на смятие не зависит от угла в вершине клина.

В нашей работе «прочность грунта на смятие» называется пассивным давлением и зависит от угла в вершине индентора. Методика расчета пассивного и активного давлений грунта хорошо разработана и давно внедрена при производстве строительных работ: например, подпорная стена, как и любая

другая ограничивающая грунт поверхность, установленная под углом к вертикали, является примером части тела-индентора, внедряемого в грунт. Пассивное и активное давления зависят от угла наклона этой поверхности. Переход от активного давления к пассивному также хорошо известен из работы [3].

В этой работе давление, оказываемое на внедряемую поверхность, так же зависит от угла в вершине индентора, пластических свойств и плотности грунта. Пластические свойства могут быть взяты из стандартов гидротехнического строительства. Следует уточнить, что грунты прибрежной зоны могут иметь существенные отличия от «стандартных».

Мы не учитываем изменение формы поверхности морского дна из-за выпора, дополнительное сопротивление и динамику грунта. Свойства нарушенного грунта и его динамика в области выпора изменяются. Исследование влияния выпора и динамики грунта на давление выходят за пределы этой работы.

Дифференциальные уравнения плоского равновесия с учетом предельного условия запишем так:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = \gamma \\ \tau_n = (\sigma_n + c \cdot \cot(\rho)) \cdot \sin(\rho) \end{cases} ; \quad (1.1)$$

где

$\tau_n$  и  $\sigma_n$  – касательное и нормальное напряжения на площадке текучести.

Решение системы (1.1.) подробно изложено в работе [3].

Третье уравнение системы (1.1) – это предельная модель или модель материала Кулона-Мора, далее модель материала грунта.

Тогда пассивное давление грунта на наклонную плоскость вдоль оси  $x'$  относительно поверхности грунта рассчитывается так [5]:

$$p(x') = x' \cdot A + B, \quad (1.2)$$

где

$$A = \frac{1 + \sin(\rho)}{1 - \sin(\rho)} \cdot \gamma \cdot (-1.5 \cdot \cos(2 \cdot \beta) + 2.5);$$

$$B = \frac{1 + \sin(\rho)}{1 - \sin(\rho)} \cdot c \cdot \cot(\rho) \cdot \exp(2 \cdot \beta \cdot \tan(\rho) + 2.5) - c \cdot \cot(\rho)$$

$\beta$  – угол наклона плоскости к вертикали, рад.;

$\gamma$  – плотность грунта, Н/м<sup>3</sup>;

$\rho$  – угол внутреннего трения грунта, рад.;

$x'$  – координата вдоль поверхности грунта.

Эпюры распределения давлений на плоскости представлены на рис. 4. Для каждой плоскости вводится угол ее наклона к плоскости XOY и ось  $x'$ . Чтобы не загромождать рис. 4 угол  $\beta$  показан только для плоскости 3, а ось  $x'$  нанесена зеленым только на плоскость 2. Например, для плоскости 1 угол  $\beta_1 = \pi/2$ .

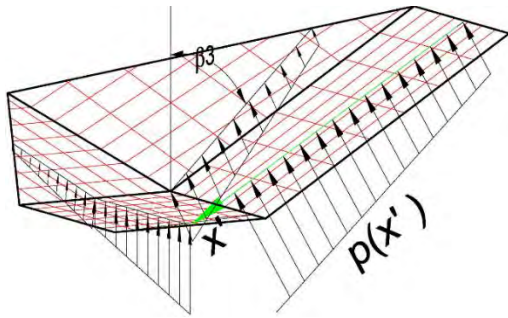


Рис. 4. Эпюры распределения давлений на модель днища

**Моделирование траектории**

Для определения траектории движения следует проинтегрировать уравнения (2):

$$\begin{cases} \frac{d^2 z_{Gl}}{dt^2} = \frac{4 \cdot [F_z(y_2) - \mu \cdot (F_x(y_2) + F_y(y_2))]}{\Delta} - \frac{4 \cdot FPM}{\Delta} \cdot z_{Gl}, \\ \frac{d^2 y_{Gl}}{dt^2} = -\frac{2 \cdot [F_y(y_2) + \mu \cdot (F_x(y_2) + F_z(y_2))]}{\Delta}, \\ y_2 = y_{Gl} - z_{Gl} \cdot \cot(\alpha) \end{cases}$$

(2)  
где

FPM – изменение веса корпуса при подъеме на 1м на носовом перпендикуляре, Н/м. Находится по форме действующей ватерлинии и форме корпуса.  
Δ – масса корпуса или водоизмещение, кг.

В правой части уравнения (2) находятся проекции силы, действующей на модель:  $F_x(y_2)$ ,  $F_y(y_2)$ ,  $F_z(y_2)$ . Сила – это результат интегрирования давления по всем плоскостям модели. Множитель 2 применяется так как модель построена для правой половины днища, левая симметрично. Множитель 4 применяется так как этот коэффициент еще раз умножается на 2: вертикальное движение судна следует разложить на вращательную и поступательную части. В результате, вертикально движется примерно половина массы судна. Знак минус в (2) применяется там, где силы действуют в направлении противоположном направлению возрастания координат z и y, совершают отрицательную работу.

Координата  $y_2$  меняется в локальной системе координат, связанной с моделью днища, а траектория записывается в глобальной системе, связанной с поверхностью грунта. Для перехода от глобальных координат к локальной служит третье уравнение в системе (2).

Блок схема расчета траектории представлена на рис. 5. J – счетчик подшага. I – счетчик шага.

Основная часть расчета – это определение координаты  $y_2$  на каждом шаге траектории. По координате  $y_2$  мы находим результирующую силу и перемещения носа судна на каждом шаге. При изменении положения носа относительно поверхности грунта меняется и сама координата  $y_2$ . На каждом шаге производится уточнение  $y_2$ ,

подшаги, и повторный расчет силы.

Кроме уточнения  $y_2$  на каждом шаге проверяется контакт с грунтом. Если касательная больше нуля, то контакта нет и силы обнуляются.

3D-изображение траектории движения показано на рис. 6. Траектория движения и глобальная система координат показаны зеленым цветом. Поверхность грунта показана синим, модель днища выделена красным.

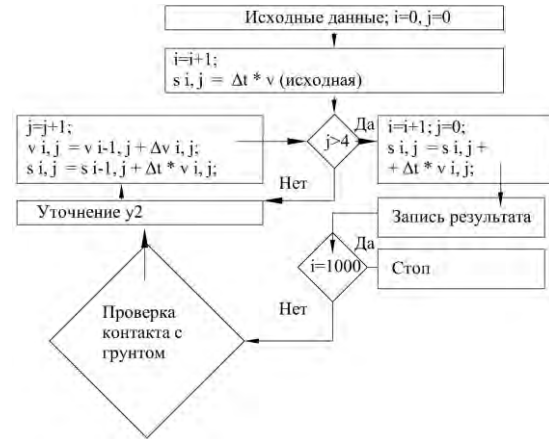


Рис. 5. Блок-схема расчёта

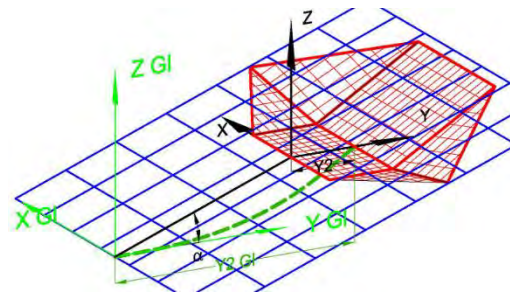


Рис. 6. Траектория движения

Рассмотрим пример расчета траектории для исходной баржи проекта 1733 «Восток» [9].

Исходные данные		
Водоизмещение,	Δ,	30.85 т.
Угол наклона морского дна,	α,	6 град.
Скорость,	v,	0.32 м/с.
Коэффициент трения,	μ,	0.4.

Сила на 1м		
подъема носа,	FPM,	1.3 · 10 <sup>5</sup> Н/м .

Свойства грунта: супесь с 60% щебня и дресвы, стр. 18 [4]: плотность, γ, 20000 Н/м<sup>3</sup>, сцепление, c, 6000Па. Угол внутреннего трения, ρ, 45<sup>0</sup>.

Эти исходные данные совпадают с условиями эксперимента, описанного в [7], где траектория движения носовой части была определена по видеосъемке с последующей кадровой разбивкой.

Экспериментальная траектория показана красным на рис. 7. Зеленым показана расчетная траектория по исходным данным. Фиолетовая точка – расчёт максимальной высоты подъема корпуса. Видно, что экспериментальная траектория почти совпадает с расчетом. Максимальная высота подъема несколько больше расчета и эксперимента, так как не учитывалось сопротивление раздвигания



грунта.

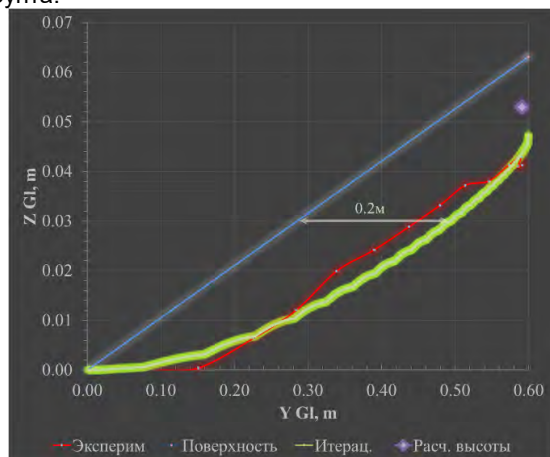


Рис. 7. Результат расчёта траектории носовой части СБ. Зеленым показан результат расчета, красным экспериментальные данные, синим поверхность грунта, точка – теоретический расчет высоты подъема

Максимальная сила действует на днище там, где максимальная площадь контакта днища с грунтом. Для определения точки траектории с максимальной силой следует определить максимальное значение  $y_2$ . По графику траектории получается  $y_2=0.2\text{м}$ .

Рассмотрим плоскость 1, так как угол наклона этой плоскости к основной плоскости судна равен 0 и давление грунта максимальное. В этой точке сила равна 0.246МН. Площадь плоскости 1 при  $y_2=0.2\text{м}$  равна  $0.2\text{ м}^2$ . Максимальное давление действует на плоскость 1, так как эта плоскость ориентирована горизонтально [6]. Площадь плоскости 1 при  $y_2=0.2\text{м}$  равна  $0.2\text{ м}^2$ . Давление 1.23МПа

Траектория представляет собой ряд едва заметных отскоков днища корпуса от грунта. Если на одном из шагов на плоскость 1 действовала сила, то после этого контакт прерывается на 10-20 шагов. Сила не действует, так как касательная к траектории становится больше угла наклона плоскости 1. Под действием силы тяжести днище опускается и контакт возобновляется.

В реальности из-за упругих свойств контакт между телами не прерывается. Максимальное давление должно быть разделено на количество шагов траектории между двумя ненулевыми значениями. В рассматриваемой точке траектории шагов с нулевым контактом получилось 16. Среднее давление между ними 72кПа. Давление грунта 72кПа.

Рассмотрим, как изменится давление на днище СБ «Восток» в условиях волнения.

Высота волны 0.5м. Вертикальная скорость -3м/с, горизонтальная скорость 2.4м/с. Остальные исходные данные остаются без изменения.

Результат расчета траектории представлен на рис. 8.

По траектории определим максимальное значение  $y_2=0.7\text{м}$ . Ширина плоской части днища 1м. Площадь контакта в этой точке  $0.7\text{ м}^2$ . Сила, действующая на плоскость 1 равна 1МН. Контакт грунта с плоскостью 1 здесь не прерывается, так как в этой области траектории касательная меньше нуля. Давление грунта найдем делением силы на

площадь. Максимальное давление грунта равно 1.5МПа.

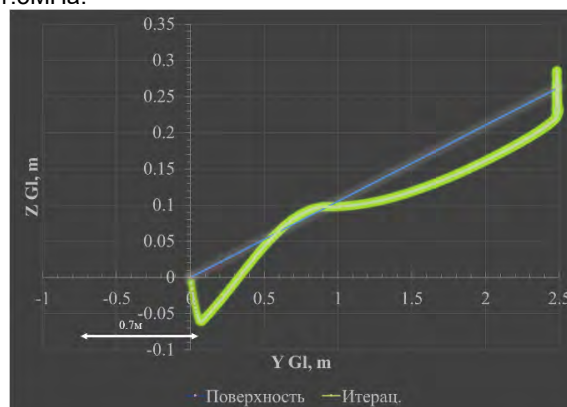


Рис. 8. Результат расчёта траектории носовой части СБ для случая контакта в условиях волнения:  $v_y = 2.4\text{м/с}$ ,  $v_z = -3\text{м/с}$

### Заключение

Основные выводы следующие.

1. Проверена работоспособность модели взаимодействия днища корпуса судна с грунтом. По траектории видно, что модель адекватно отражает след, оставленный судном в эксперименте.

2. Определено давление. При отсутствии вертикальной скорости давление вполне соответствует прочности реального судна.

3. Рассчитано давление в условиях волнения. При начальной вертикальной скорости давление существенно выше.

4. Днище с плоской частью существенно хуже в условиях динамического контакта. Что следует уже из формулы давления и подтверждается дальнейшими расчетами. Для нивелирования эффекта плоского днища можно установить днищевые брусья или изменить форму.

Итерационный расчет, выполненный в этой работе, позволил определить траекторию движения носовой части корпуса при контакте с грунтом и максимальное давление на днище корпуса самоходной баржи СБ «Восток» для двух случаев эксплуатации: без волнения в акватории и с волнением.

В первом случае судно имеет незначительную горизонтальную скорость и нулевую вертикальную скорость. Максимальное давление в этом случае 72кПа. Давление грунта, в основном, обеспечивает вытеснение носовой части корпуса из воды из-за наклона поверхности морского дна.

Более опасная ситуация возникает в условиях волнения. Для моделирования были выбраны: высота волны 0.5м, вертикальная скорость при контакте с грунтом -3м/с. Максимальное давление оказалось равным 1.5МПа. Это давление может выдержать судно с ледовыми усилениями. Прочность корпуса рассматриваемого судна недостаточна, поэтому условия швартовки должны быть ограничены отсутствием волнения или конструкция днища СБ «Восток» должна быть существенно усилена [8].

Расчет был выполнен с учетом контакта. Наличие контакта при моделировании учитывалось так: если касательная к траектории оказывалась меньше угла наклона днища, то сила давления

грунта не обнулялась, в противном случае носовая часть двигалась только под действием собственного веса. Такой процесс представляет собой моделирование скольжения.

Плоскость 1, моделирующая горизонтальный киль днища, установлена горизонтально. Пассивное давление грунта на эту плоскость максимальное. Кроме этого, из-за волнения косовая часть корпуса имеет отрицательную скорость в начале контакта. Касательная к траектории отрицательная, поэтому контакт следует непрерывно, грунт оказывает существенное давление в область горизонтального киля.

Чтобы безопасно эксплуатировать суда, швартующиеся к необорудованному берегу следует учитывать следующие особенности: форма днища, свойства грунта, волнение и параметры судна. Корпус с усиленным днищем может эксплуатироваться в неблагоприятных условиях, напротив, «слабый» корпус может эксплуатироваться, только с ограничениями по скорости перед швартовкой и почти полном отсутствии волнения, что возможно в закрытых бухтах в хорошую погоду.

В работе не использовались программные продукты, например, ANSYS или LS-DYNA, основанные на численных методах, по следующим причинам.

Решалась задача связать основные особенности взаимодействия судна с грунтом и давление. Численные методы дают число, поэтому требуют повторений расчетов для анализа. Упрощенная модель этой работы удобнее, так как позволяет частично провести анализ перед расчетом. Например, давление грунта растет при увеличении развала шпангоутов: угол  $\beta$  в формуле (1). Увеличение коэффициента FPM в формуле (2), связанное с формой корпуса судна, также повысит давление.

Аналитические методы позволяют работать с естественно научными фактами, поэтому они более удобны.

Программные продукты являются в некоторой степени «черным ящиком», с которым нужно уметь обращаться.

Численный метод вне связи с программным продуктом свои имеет особенности: разбивка на элементы, точность вычисления и т.п.

### Литература

1. Азовцев А.И., Евенко В.И., Кулеш В.А., Кутейников М.А., Огай А.С., Петров В.А. Предложения по развитию требований к судам, эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт. Научнотехнический сборник Российского морского регистра судоходства. №42/43. СПб. 2016. С.47-58.
2. Кулеш В.А. Нагрузки взаимодействия при ударах корпуса судна о грунт. Морские интеллектуальные технологии. № 3 (33) Т.1 2016. С.75-80.
3. Соколовский В.В. Теория пластичности. Изд. 3-е. М.: Высшая школа, 1969. 80 с.
4. Справочное пособие для обработки материалов инженерногеологических изысканий. – М: ДАРВОДГЕО, 2005. - 94 с. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293841/4293841862.pdf>
5. Мамонтов, А.И. Моделирование нагрузки на корпус судна при торможении о песчано-гравийное основание [Электронный ресурс] / А.И. Мамонтов, С.В. Антоненко, В.Г. Бугаев, Н.Я. Цимбельман // ISOPE-2015 "25-я Международная конференция по океанской и полярной инженерии": [сайт]. [2016]. <https://www.onepetro.org/conference-paper/ISOPE-I-15-439>
6. Мамонтов, А.И. Нагрузка на корпус при торможении о песчано-гравийное основание / А.И. Мамонтов, В.Н. Миронов // Труды Центрального научно-исследовательского института им. А.Н. Крылова. – 2015. – № 89.2(373.2)– С. 43–55.
7. Мамонтов, А.И. Натурный эксперимент: определение давления на корпус судна при контакте с грунтом / А.И. Мамонтов, А.М. Шмелев, А.О. Фролова // Морские интеллектуальные технологии. – 2015. – № 4(30) Т.2. – С. 9–18. [http://morintex.ru/wp-content/files/mf/1450116962%D0%9C%D0%98%D0%A2430%D0%A22\\_2015%D0%9F%D0%A3%D0%93%D0%90%D0%A7%D0%95%D0%92.pdf](http://morintex.ru/wp-content/files/mf/1450116962%D0%9C%D0%98%D0%A2430%D0%A22_2015%D0%9F%D0%A3%D0%93%D0%90%D0%A7%D0%95%D0%92.pdf)
8. Мамонтов, А.И. Давление на корпус судна, швартующегося к необорудованному берегу [Электронный ресурс] / А.И. Мамонтов, А.М. Шмелев, А.О. Фролова, В.Г. Бугаев, С.В. Антоненко, Н.Я. Цимбельман // ISOPE-2016 "26-я Международная конференция по океанской и полярной инженерии": [сайт]. [2016]. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/ISOPE-I-16-133>
9. Мамонтов, А.И. Определение давления на днище корпуса судна по деформации корпусных конструкций // Журнал морских инженеров – 2017. – № 129-1. – С. 165–177. <https://www.ingentaconnect.com/contentone/asne/nej/2017/00000129/00000001/art00022>

### References

1. Azovtsev A.I., Evenko V.I., Kulesh V.A., Kuteynikov M.A., Ogay A.S., Petrov V.A. Proposals for the Development of Requirements for Ships, the Operation of Which Involves Landing on the Ground. Scientific and Technical Collection of the Russian Maritime Register of Shipping. №42/43. SPb. 2016. S.47-58.
2. Victor A. Kulesh Contact Loads of Ship Hull Impact Against Ground. Marine Intellectual Technologies. № 3 (33) V.1 2016. pp.75-80.
3. Sokolovsky V.V. Theory of Plasticity. Ed. 3. M., Higher School, 1969, 80 p.
4. Reference Guide for Geological Engineering Surveys. - Moscow: "Darvodgeo". 2005. 94 P. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293841/4293841862.pdf>
5. Mamontov, A.I. Simulation of Loads Acting on a Hull during Braking on a Sandy-Gravel Seabed [Electronic resource] / Andrey I. Mamontov, Sergey Vladimirovich Antonenko, Viktor Grigorievich Bugaev, // Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/ISOPE-I-15-439>.
6. Mamontov, A.I. The Load on the Hull as Result of Braking on a Sandy-Gravel Seabed / A.I. Mamontov, V.N.

- Mironov // The Proceedings of the Krylov State Research Centre. - 2015. - No. 89.2 (373.2) - pp. 43–55.
7. Mamontov, A.I. The Full-Scale Experiment: Measure Deformation of Bottom Hull Structures due to Grounding or Beaching upon the Coastal Seabed / A.I. Mamontov, A.M. Shmelev, A.O. Frolova // Marine Intellectual Technologies. - 2015. - No. 4 (30) T.2. pp. 9 – 18. URL: [http://morintex.ru/wp-content/files\\_mf/1450116962%D0%9C%D0%98%D0%A2430\\_%D0%A22\\_2015%D0%9F%D0%A3%D0%93%D0%90%D0%A7%D0%95%D0%92.pdf](http://morintex.ru/wp-content/files_mf/1450116962%D0%9C%D0%98%D0%A2430_%D0%A22_2015%D0%9F%D0%A3%D0%93%D0%90%D0%A7%D0%95%D0%92.pdf)
  8. Mamontov, A.I. The Pressure of Hull Impact on Sea Bed in Shallow Water [Electronic resource] / Andrey I. Mamontov, Anna O. Frolova, Viktor Grigorievich Bugaev, Sergey Vladimirovich Antonenko, Alexander M. Shmelev // Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/ISOPE-I-16-133>.
  9. Mamontov, A.I. The Full-Scale Experiment: Measure the Deformation of Bottom Hull Structures due to Grounding or Beaching upon the Coastal Seabed // Naval Engineers Journal. - 2017. - 129.1 pp. 165 – 177. URL: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/asne/nej/2017/00000129/00000001/art00022>

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Андрей Игоревич Мамонтов**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет 690922, Владивосток, о. Русский, Кампус ДВФУ, корп. С, уровень 7, С 730, e-mail: Andrew.Mamontov@outlook.com

**Andrey I. Mamontov**, Ph.D. (Eng), Associate professor, Associate professor of Shipbuilding and ocean engineering department, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8, e-mail: Andrew.Mamontov@outlook.com

**Максим Владимирович Китаев**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет 690922, Владивосток, о. Русский, Кампус ДВФУ, корп. С, уровень 7, С 729, e-mail: kitaev.mv@dvmfu.ru

**Maksim V. Kitaev**, Ph.D. (Eng), Associate professor, the Head of Shipbuilding and Ocean Engineering Department, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8, e-mail: kitaev.mv@dvmfu.ru

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

**Konstantin A. Molokov**, Ph.D. (Eng), assist: professor, assistant professor of the Department Welding Engineering, Far Eastern Federal Univer 690950, Vladivostok, st. Sukhanov, 8, mail: spektrum011277@gmail.com

**Олег Эдуардович Суоров**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет 690922, Владивосток, о. Русский, Кампус ДВФУ, корп. С, уровень 6, С 614, e-mail: surov.oye@dvmfu.ru

**Oleg E. Surov**, Ph.D. (Eng), Associate professor, Associate professor of Shipbuilding and ocean engineering department, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8, e-mail: surov.oe@dvmfu.ru

**Валерий Васильевич Новиков**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет 690922, Владивосток, о. Русский, Кампус ДВФУ, корп. С, уровень 7, С 719, e-mail: leka230243@gmail.com

**Valery V. Novikov**, Ph.D. (Eng)s, Associate professor, Associate professor of Shipbuilding and ocean engineering department, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8, e-mail: leka230243@gmail.com

УДК 532.526.2, 624.124  
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.039

## Возможности повышения эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова за счет использования близости берега к месту выполнения ледокольных работ

В.М. Козин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментальных исследований зависимости амплитуды прогиба изгибно-гравитационных волн, возбуждаемых в ледяном покрове движущейся вблизи и вдоль берега нагрузкой в ледяном покрове, от угла наклона дна бассейна. Опыты проводились на ледяном покрове как в полевых условиях с натурными судами на воздушной подушке, так и в опытовом бассейне Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета с использованием искусственной модели льда. Показана возможность существенного увеличения эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова за счет соответствующего использования близости его береговой линии к месту выполнения ледокольных работ (мелководья и переменности глубины, т.е. наклона дна бассейна) и изменения расстояния от СВП до берега. Приведены рекомендации по использованию угла наклона дна, близости береговой линии к месту выполнения ледокольных работ и изменения уровня воды в водоеме для повышения эффективности разрушения ледяного покрова (увеличения толщины разрушаемого льда) резонансным методом.

**Ключевые слова:** ледяной покров, изгибно-гравитационные волны, амплитуда прогибов, разрушение, резонансный метод, моделирование.

## Possibilities to improve the effectiveness of the resonant method of destruction of the ice cover by using the proximity of the coast to the place of performance of icebreaking works

Viktor M. Kozin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

**Abstract.** The paper presents the results of experimental studies of the dependence of the deflection amplitude of bending and gravitational waves excited in the ice cover by a load moving near and along the shore in the ice cover on the angle of the bottom of the pool. Experiments were conducted on the ice cover both in the field with full-scale hovercrafts, and in the experimental pool of the Amur humanitarian and pedagogical state University using an artificial ice model. The possibility of a significant increase in the effectiveness of the resonant method of ice cover destruction due to the appropriate use of the proximity of its coastline to the place of icebreaking operations (shallow water and depth variability, i.e., the slope of the pool bottom) and changes in the distance from the SVP to the shore. Recommendations are given for using the bottom slope angle, proximity of the coastline to the site of icebreaking operations, and changes in the water level in the reservoir to improve efficiency.

**Key words:** ice cover, flexural-gravitational waves, amplitude of deflections, fracture, resonance method, modeling.

### Введение

Решение таких ледотехнических проблем, как: борьба с ледовыми осложнениями в виде заторов и зажоров на реках, текущих с юга на север; продление навигации на внутренних водных путях; раннее вскрытие ото льда водохранилищ на нижнем бьефе гидроэлектростанций с целью повышения их выработки электроэнергии; поведение и разрушение ледяного покрова от действия динамических нагрузок и пр. имеет важное народнохозяйственное значение. Об этом свидетельствует значительное количество публикаций, первые из которых появились еще в конце XIX века. Относительно подробный обзор работ по распространению в ледяном покрове волн, возбуждаемых динамическими нагрузками, приведен в работе [1]. В настоящей статье рассмотрены лишь работы примерно за последний десяток лет и наиболее близкие, на наш взгляд, к рассматриваемой задаче. Поведению полубесконечного ледяного покрова при равномерном движении нагрузки, а также колебаниям ледяной пластины с трещиной при воздействии на него периодической нагрузки

посвящены статьи Ткачевой Л.А. [2,3]. Плоская задача о воздействии нескольких ударных импульсов на вязкоупругую пластину, плавающую на поверхности жидкости, решена А.В. Погореловой в работе [4]. Статья Ткачевой Л.А. [5] посвящена плоской задаче о влиянии периодической внешней нагрузки на колебания полубесконечной упругой пластины. Задачи о дифракции поверхностных волн на плавающей упругой пластине и ее нестационарном поведении под действием внешней нагрузки на мелководье исследовались в работах Стуровой И.В. [6,7]. Волнам в море с плавающим ледяным покровом посвящена монография Букатова А.Е. [8]. Коробкин А.А. и Хабахпашева Т.И. в работе [9] рассмотрели варианты построения точных решений в задаче о плавающей пластине. Исследованиям затухания поверхностных гравитационных волн в прикромочной зоне дрейфующего льда посвящена работа Марченко А.В. и Чумакова М.М. [10]. В работе [11] рассмотрены различные задачи распространения поверхностных волн в ледовых условиях.

Проведенный анализа рассмотренных и более ранее выполненных работ [1] показал отсутствие



исследований по рассматриваемой в работе задаче, т.е. повышению эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова (РМРЛ), сущность которого изложена в работах [12,13], за счет использования близости берега к месту выполнения ледокольных работ. Ввиду сложности процесса разрушения ледяного покрова в указанных условиях в работе приведены только общие сведения по разрушению льда судами на воздушной подушке (СВП) в полевых условиях и результаты исследований, выполненных в опытовом бассейне на моделирующих ледяной покров упругих пленках. Как показали эти предварительно выполненные эксперименты, использование близости берега к месту выполнения ледокольных работ может существенно повысить эффективность РМРЛ, т.е. снизить энергозатраты на разрушение льда по сравнению с его реализацией в условиях бесконечного ледяного поля.

### 1. Опыт использования РМРЛ вблизи береговой линии ледяного покрова

РМРЛ может осуществляться любым транспортным средством, обладающим способностью перемещаться по ледяному покрову с достаточной скоростью и возбуждающим изгибно-гравитационные волны (ИГВ) необходимой для разрушения льда амплитудой (изгибных напряжений), т.е. достаточными массо-габаритными характеристиками [13]. С этой точки зрения для эффективного использования и обеспечения безопасности эксплуатации при реализации РМРЛ транспортными средствами наиболее пригодны амфибийные СВП, ледоразрушающие качества которых исследовались в натуральных условиях [12]. При этом во время проведения испытаний СВП «Тайфун» на Горьковском водохранилище (1985 г.) и «Скат» на реке Амур (1984–1987гг.) было обнаружено, что в случаях, когда ледяной покров не удавалось разрушить при движении судов с резонансной скоростью (вес судна и давление в его воздушной подушке были недостаточными для разрушения льда данной толщины), то удавалось разрушить кромку льда при движении судна вблизи к его береговой линии (рис. 1). Аналогичные процессы наблюдались и при движении автомобилей (рис. 2).



Рис.1 Разрушение ледяного покрова СВП «Скат» при его движении вблизи к береговой линии



Рис.2 Разрушение ледяного покрова при движении автомобиля вдоль его береговой кромки

Очевидно, что это связано с трансформацией параметров ИГВ при их выходе на ярко выраженное мелководье с наклонным дном водоема (в этих условиях происходит уменьшение длины, с одновременным увеличением высоты ИГВ, т.е. увеличение изгибных напряжений во льду) и с их взаимодействием с отражёнными от берега волнами. После чего полосу разрушенного ледяного покрова удавалось расширить за счёт последующих проходов СВП вдоль берега с резонансной скоростью (рис. 3, 4), т.к. наличие свободной кромки значительно уменьшает несущую способность ледяного покрова.



Рис.3 Разрушение ледяного покрова СВП «Тайфун» при движении с резонансной скоростью вблизи и параллельным к берегу курсом



Рис.4 Разрушение ледяного покрова СВП «Скат» при повторном проходе вдоль берега

Эти факты послужили основанием для более детальных экспериментальных модельных исследований с целью изучения возможностей повышения эффективности РМРЛ за счёт использования подобных ледовых условий и вышеописанного маневрирования СВП.

**2. Модельные эксперименты**

Эксперименты проводились в опытном бассейне (L×B×H = 5,0×1,9×0,7 м) лаборатории механики сплошных сред Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета (рис. 5) в соответствии с методикой моделирования ИГВ в ледяном покрове [14].



Рис.5 Опытный бассейн АмГПУ

Моделирование ледяного покрова осуществлялось с использованием модели не разрушаемого льда. В качестве модельного материала использовалась листовая резина толщиной 2 мм, удовлетворяющая приемлемым условиям геометрического подобия и физико-механическим характеристикам модельного льда, что в бассейне с его выше указанными геометрическими параметрами практически исключало влияние масштабного эффекта на результаты экспериментов. Значения и зависимость модуля упругости резины от скорости ее нагружения определялась путем испытаний образцов материала на растяжение при характерных для резонансных периодов ИГВ режимах на специально изготовленном стенде [12]. Его среднее значение составило 6 МПа, что, в соответствии с методикой моделирования [14], обеспечивало проведение модельных экспериментов в масштабе 1:500, т.е. в опытах моделировался ледяной покров толщиной 1 м. ИГВ возбуждались движущейся за счет буксировочной системы бассейна нагрузкой (моделью СВГ).

**3. Результаты экспериментальных исследований**

Исследования проводились при различных углах наклона дна  $\gamma$  ( $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ), при глубине акватории после пересчета на натуру  $H = 30$  м и расстояниях от линии движения нагрузки до берега  $B = 10$ ;  $20$  м. Наклонность дна и условия экспериментов моделировались по схеме, представленной на рис. 6 (где  $S$  – длина наклонного дна). Для  $30^\circ S$  составляла 150 м; для  $20^\circ$  – 220 м; для  $10^\circ$  – 430 м (также после пересчета на натуру).

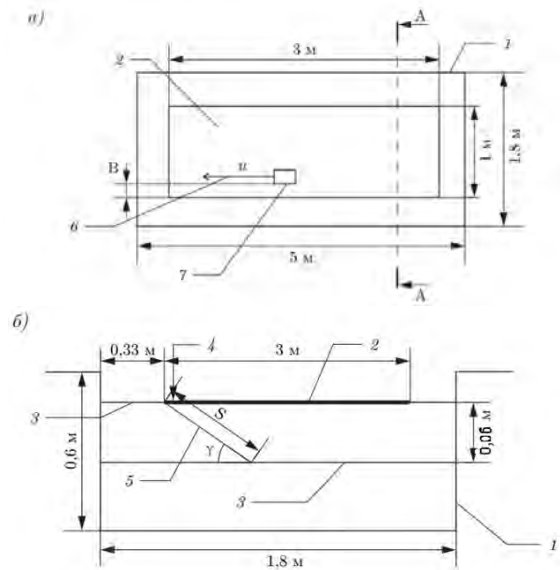


Рис. 6 Схема установки: а) – вид сверху, нагрузка движется справа налево; б) – сечение по А–А, нагрузка движется от нас в плоскость рисунка: 1 – чаша бассейна; 2 – модельный лёд; 3 – подвесное дно; 4 – место установки датчика; 5 – наклонное дно; 6 – направление движения нагрузки; 7 – нагрузка

В процессе проведения экспериментов были получены зависимости относительной амплитуды прогибов ИГВ  $\bar{A}$  (где  $\bar{A} = A/\omega_p$ ;  $A$  – амплитуда прогиба волны;  $\omega_p$  – статический прогиб модельного льда под нагрузкой) от относительных скоростей нагрузки  $\chi$  (где:  $\chi = u / \sqrt{gH}$ ;  $u$  – скорость нагрузки,  $g$  – ускорение свободного падения) при различных углах наклона дна (рис. 7) и зависимости относительных амплитуд прогибов пластины  $\bar{A}^*$  (где:  $\bar{A}^* = A_B / A_\infty$ ;  $A_B$  – амплитуда прогибов при движении нагрузки на расстоянии  $B$  от берега;  $A_\infty$  – амплитуда прогибов вдали от берега, т.е. когда влияние берега становилось незначительным) от расстояния до берега (рис. 8).

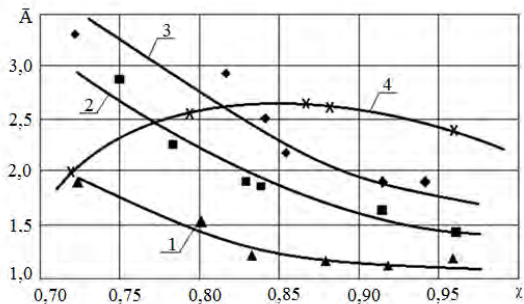


Рис. 7 Зависимость относительных амплитуд прогибов пластины от скорости нагрузки и угла наклона дна берега при  $B = 10$  м: 1 (▲) -  $10^\circ$ ; 2 (■) -  $20^\circ$ ; 3(◆) -  $30^\circ$ ; 4(x) – вдали от берега

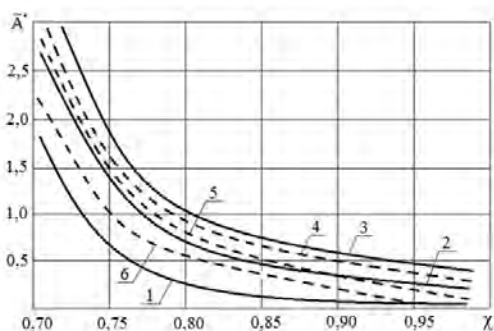


Рис. 8 Зависимость относительных амплитуд прогибов пластины  $\bar{A}^* = AB / A \infty$  от скорости и расстояния нагрузки до берега (—  $B = 10\text{ м}$ ; - - -  $B = 20\text{ м}$ ): и угла наклона его дна: 1, 6 -  $\gamma = 10^\circ$ ; 2, 5 -  $\gamma = 20^\circ$ ; 3, 4 -  $\gamma = 30^\circ$

Как видно из рис. 7 (при  $B = 10\text{ м}$ ), в области низких скоростей наиболее эффективным оказалось движение нагрузки вдоль более крутого берега. С ростом скорости нагрузки амплитуда прогибов ИГВ начинала уменьшаться. К аналогичному результату приводило и уменьшение наклона дна.

На основании рис. 8 можно судить об одновременном влиянии на деформации пластины как угла наклона дна у берега, так и близости нагрузки к нему при ее движении вдоль его береговой линии. Очевидно, что интенсивность изменения амплитуд прогибов ИГВ в зависимости от указанных параметров позволяет прогнозировать изменение эффективности РМРЛ.

#### 4. Рекомендации для повышения эффективности РМРЛ за счет использования близости берега к месту выполнения ледокольных работ

Выполненные экспериментальные исследования показали, что для увеличения возможностей РМРЛ (в случаях, когда имеющееся СВП не способно разрушить ледяной покров заданной толщины при его движении с резонансной скоростью) следует найти участок акватории с крутым берегом, а значит, и большим углом наклона дна. Затем на разных скоростях, близких к резонансным для средней глубины водоема на данном участке, следует сделать несколько проходов СВП вдоль берега в непосредственной от его близости. После ослабления льда возникшими в нем трещинами или разрушения кромки ледяного покрова судно нужно перемещать вдоль берега с резонансной для соответствующих глубин скоростью. В результате за счет использования близости берега и рельефа дна будет разрушен более толстый лед, т.е. повышена эффективность РМРЛ.

Использовать наклонность дна у берега для повышения ледоразрушающей способности ИГВ, возбуждаемых СВП, можно также следующим образом. Если параметры судна не позволяют разрушить ледяной покров резонансным методом в данных ледовых условиях, то ожидают время наступления максимального подъема уровня воды (или прилива). За счет этого ледяной покров, примерзший к берегу, очевидно, начнет испытывать увеличивающиеся изгибные деформации у его

береговой кромки, т.е. в месте своеобразной жесткой заделки (иногда в морских условиях они являются причиной отрыва берегового припая от берега). Для их использования при разрушении льда резонансными ИГВ СВП при достижении максимального подъема уровня воды следует перемещать в непосредственной близости к береговой линии. Это приведет к появлению изгибных деформаций от возбуждаемых ИГВ, периодически совпадающих по знаку с деформациями от прилива, т.е. увеличит суммарные изгибные напряжения во льду у берега. В результате при достаточных параметрах СВП (амплитуды возбуждаемых ИГВ) кромка ледяного покрова разрушится. Наличие у льда свободной кромки уменьшит его несущую способность. Последующие проходы СВП вдоль этой кромки с резонансной скоростью приведут к возбуждению ИГВ большей амплитуды, что увеличит ледоразрушающую способность судна, т.е. толщину разрушаемого льда [15].

Во время понижения уровня воды (или отлива) в кромке ледяного покрова, примороженной к берегу, также возникнут соответствующие изгибные напряжения. Если эти напряжения использовать, т.е. суммировать с изгибными напряжениями, возникающими от возбуждения ИГВ при движении СВП, то можно увеличить толщину ледяного покрова, разрушаемого резонансным методом.

Известно, что при статическом нагружении ледяной пластины поперечной нагрузкой последняя деформируется так, что ее упругая линия вне зоны нагружения имеет вид синусоидальной затухающей волны. Расстояние между максимумами этих волн постоянно и равно длине волны статического прогиба ледяной пластин. Таким образом, максимальные изгибные напряжения, возникающие в ледяном покрове во время отлива, будут возникать на расстоянии от примороженной к берегу кромки льда, равном полудлине волны статического прогиба. При возбуждении ИГВ от движущегося с резонансной скоростью СВП лед разрушается под судном, т.е. на подошве ИГВ, где будет происходить суммирование изгибных напряжений от развившегося волнового процесса во льду и от квазистатической нагрузки, создаваемой весом СВП [12]. Если к этим напряжениям добавить с соответствующим знаком напряжения, возникающие от изгиба льда по его береговой кромке во время отлива, то толщина ледяного покрова, разрушаемого СВП резонансным методом, возрастет. Для использования этой закономерности следует ожидать время наступления максимального понижения уровня воды. За счет этого ледяной покров, примерзший к берегу, начнет испытывать наибольшие изгибные деформации. Для их использования при разрушении льда резонансными ИГВ СВП во время достижения максимального уровня отлива следует перемещать сначала вдоль береговой линии на расстоянии от кромки примерзшего к берегу льда, равном полудлине волны статического прогиба ледяного покрова. В результате в ледяном покрове под судном произойдет суммирование изгибных напряжений от развившегося во льду волнового процесса, от квазистатической нагрузки, создаваемой весом СВП, и от изгиба ледяного покрова из-за отлива. В итоге



прочность кромки льда у берега за счет трещинообразования понизится и при достаточной массе СВП лед разрушится. Затем судно необходимо перемещать с резонансной скоростью вдоль образовавшейся свободной кромки. Ее наличие уменьшит его несущую способность, что увеличит амплитуду ИГВ, т.е. толщину разрушаемого льда, при неизменных энергозатратах (мощности) СВП [16].

Задача по использованию наклонности дна для повышения ледоразрушающей способности ИГВ дополнительно к вышеописанному может быть решена следующим путем. Судну одновременно с движением вдоль берега сообщают поперечные перемещения с амплитудой, не превышающей половину длины их волны с частотой резонансных ИГВ. Поперечные перемещения, т.е. движение бортом к берегу и от него, и неизбежно сопутствующий этому крен приведут к возбуждению дополнительной системы резонансных ИГВ. Эти волны при приближении к берегу, т.е. при выходе на ярко выраженное мелководье с наклонным дном, будут трансформироваться: их длина будет уменьшаться, а высота - увеличиваться. В результате наложение этой волновой системы на систему ИГВ от поступательного движения СВП вдоль береговой линии приведет к увеличению высоты суммарных ИГВ, что увеличит их ледоразрушающую способность. Периодические перемещения судна с амплитудой, не превышающей половину длины волны статического прогиба ледяного покрова, будут способствовать генерации более интенсивных дополнительных ИГВ, так как

смещение от подошвы к вершине волны будет сопровождаться появлением у судна знакопеременного максимального крена, т.е. увеличению амплитуды возбуждаемых волн. Таким образом, вышеописанное маневрирование СВП за счет использования близости берега повысит его ледоразрушающую способность [17].

### Заключение

Выполненные экспериментальные исследования ледоразрушающих способностей СВП в натуральных ледовых условиях, а также их моделей в опытовом бассейне на неразрушаемой (полимерной) модели льда показали возможность существенного увеличения эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова за счет соответствующего использования близости его береговой линии к месту выполнения ледокольных работ (мелководья и переменности глубины, т.е. наклона дна бассейна), что делает целесообразным проведение дальнейших более детальных экспериментально-теоретических исследований. Так, в рассмотренных диапазонах изменения углов наклона дна вблизи берега, скоростей и расстояниях до него деформации, а значит и изгибные напряжения, возрастали более, чем в два раза. Кроме этого, приведены разработанные автором приемы маневрирования СВП вблизи кромки льда, увеличивающие его разрушаемую толщину.

Работа выполнена в рамках гос. задания ХФИЦ ДВО РАН.

### Литература

1. Экспериментально-теоретические исследования зависимости параметров распространяющихся в плавающей пластине изгибно-гравитационных волн от условий их возбуждения / В.М. Козин [и др.], под общ. ред. В.М. Козина. Приамур. гос. ун-т им. Шолом-Алейхема, Амурск. гум.-пед. гос. ун-т, Ин-т машиноведения и металлургии ДВО РАН. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2016. – 222 с. ISBN 978-5-7962-1504-9
2. Ткачева Л.А. Поведение полубесконечного ледяного покрова при равномерном движении нагрузки // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59, № 2 (348). С. 82-98.
3. Ткачева Л.А. Колебания ледяного покрова с трещиной при воздействии периодической по времени нагрузки // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2017. № 2. С. 54-64.
4. Погорелова А.В. Плоская задача о воздействии нескольких ударных импульсов на вязкоупругую пластину, плавающую на поверхности жидкости // ПМТФ. 2010. Т. 51, № 2. С. 155-163.
5. Ткачева Л.А. Воздействие периодической нагрузки на плавающую пластину // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2005. № 2. С. 132-146.
6. Стурова И.В. Дифракция поверхностных волн на упругой плавающей на мелководье платформе // Прикладная математика и механика. 2001. Т.65, № 1. С. 114-122.
7. Стурова И.В. Нестационарное поведение плавающей на мелководье балки под действием внешней нагрузки // ПМТФ. 2002. Т. 43, №. 3. С. 88-98.
8. Букатов А.Е. Волны в море с плавающим ледяным покровом. Севастополь: ФГБУН МГИ. 2017, 360 с.
9. Коробкин А.А., Хабахпашева Т.И. Построение точных решений в задаче о плавающей пластине // Прикладная математика и механика. 2007. Т. 71, вып. 2. С. 321-328.
10. Марченко А.В., Чумаков М.М. Исследование затухания поверхностных гравитационных волн в прикромочной зоне дрейфующего льда Баренцева моря // Вести газовой науки. 2017. № 4 (32). С. 94-103.
11. Распространение поверхностных волн в ледовых условиях / Букатов А.Е., Букатов А.А., Жарков В.В., Завьялов Д.Д. Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ. 2019. – 204 с. ISBN 978-9908460-7-4
12. Козин В.М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова. Изобретения и эксперименты. М.: Академия естествознания. ISBN 978-5-91327-017-7, 2007. 355 с.
13. Козин В.М., Земляк В.Л. Физические основы разрушения ледяного покрова резонансным методом. Комсомольск-на Амуре: ИМиМ ДВО РАН, ПГУ им. Шолом-Алейхема, АмГПГУ. 2013, 250 с. ISBN 978-5-85097-519-0
14. Козин, В.М. Моделирование изгибно-гравитационных волн в сплошном ледяном покрове // Теория и прочность ледокольного корабля. 1982. № 3. С. 35–38.
15. Патент 2203826 РФ. Способ разрушения ледяного покрова / Козин В.М. // МПК В63В 35/08. Оpubл. 10.05.2003. Бюл. № 14.



16. Патент 2211169 РФ. Способ разрушения ледяного покрова / Козин В.М. // МПК В63В 35/08. Оpubл. 27.08.2003. Бюл. № 24.  
 17. Пат. 2531857 РФ. Способ разрушения ледяного покрова / Козин В.М., Земляк В.Л., Верещагин В.Ю. и др. // МПК В63В 35/08. Оpubл. 27.10.2014. Бюл. № 30.

#### References

- 1 Experimentalno-teoreticheskie issledovaniya zavisimosti parametrov rasprostranyayushchihsvya v plavayushchej plastine izgibno-gravitazionnyh voln ot uslovij ih vozбуzhdения / V.M.Kozin [i dr.], pod obzh. red. V.M.Kozina. [Amur state University named after Shalom-Aleichem, Amur humanitarian and pedagogical University, Institute of machine science and metallurgy of the far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences]. - Novosibirsk: Izd-vo SO RAN. 2016. - 222 s. ISBN 978-5-7962-1504-9
- 2 Tkacheva L.A. Povedenie polubesconehnogo ledyanogo pocrova pri ravnomernom dvizhenii nagruzki [Applied mechanics and technical physics]. 2018. t. 59, № 2 (348). S. 92-98.
- 3 Tkacheva L.A. Kolebaniya ledjanogo pocrova s treshchinoj pri vozdejsvtvii periodichescoj po vremeni nagruzki [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Fluid and gas mechanics]. 2017. № 2. S. 54-64.
- 4 Pogorelova A.V. Ploscaya zadacha o vozdejstvii nescolcuh udarnyh impulsov na vyazcoupruguyu plastinu, plavayushchuyu na poverhnosti shchidcosti [Applied mechanics and technical physics]. 2010. T. 51, № 2. S. 155-163.
- 5 Tkacheva L.A. Vozdejsctie periodicheskoj nagruzki na plavayushchuyu plastinu [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Fluid and gas mechanics]. 2005. № 2. S. 132-146.
- 6 Sturova I.V. Difrakziya poverhnostnyh volnna uprugoj plavayushchej na melkovode platforme [Applied mathematics and mechanics]. 2001. T.65, № 1. S. 114-122.
- 7 Sturova I.V. Nestazionarnoe povedenie plavayushchej na melkovodbe balki pod dejstviem vneshnej nagruzki [Applied mechanics and technical physics]. 2002. T.43, № 3. S. 88-98.
- 8 Bukatov A.E. Volny v more s plavayushchim ledyanym pokrovom. Sevastopolb: FGBUN MGI. 2017. 360 s.
- 9 Korobkin A.A., Habahpasheva T.I. Postroenie tohnyh reshenij v zadahe o plavaqyushchej plastine [Applied mathematics and mechanics]. 2007. T.71, vyp. 2. S. 321-328.
- 10 Marhenko A.V., Chumakov M.M. Issledovanie zatuhaniya poverhnostnyh gravitazionnyh voln v prikromochnoy zone dreyfuyushchego lbdа Barenzevogo morya [Gas science news]. 2017. № 4 (32). S. 94-103.
- 11 Rasprostranenie poverhnostnyh voln v ledovyh usloviyah / Bukatov A.E., Bukatov A.A., Zavbyalov D.D. Sevastopolb: FGBUN MGI. 2019. 204 s. ISBN 978-9908460-7-4
- 12 Kozin V.M. Rezonansnyj metod razrusheniya ledyanogo pocrova. Izobreteniya i eksperimenty [Moscow: Academy Of Natural Science]. ISBN 978-91327-017-7. 2007. 355 s.
- 13 Kozin V.M., Zemlyak V.L. Fizicheskie osnovy razrusheniya ledyanogo pocrova rezonansnym metodom [Komsomolsk-on-Amur: Amur state University named after Shalom-Aleichem, Amur humanitarian and pedagogical University, Institute of machine science and metallurgy of the far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences ]. 2013, 250 s. ISBN 978-5-85097-519-0
- 14 Kozin V.M. Modelirovanie izgibno-gravitazionnyh voln v sploshnom ledyanom pocrove [Theory and the strength of the ship]. 1982. № 3. S. 35-38.
- 15 Patent 2203826 RF. Sposob razrusheniya ledyanogo pocrova [the patent of the Russian Federation № 2203826] / Kozin V.M. // МПК В63В 35/08. Оpubl. 10.05.2003. Byul. № 14.
- 16 Patent 2211169 RF. Sposob razrusheniya ledyanogo pocrova [the patent of the Russian Federation the paten of the Russian Federation № 2211169 ] / Kozin V.M. // МПК В63В 35/08. Оpubl. 27.08.2003. Byul. № 24.
- 17 Patent 2531857 RF. Sposob razrusheniya ledyanogo pocrova [the patent of the Russian Federation № 2531857] / Kozin V.M., Zemlyak V.L., Vereshchagin V.Yu. // МПК В63В 35/08. Оpubl. 27.10.2014. Byul. № 30.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Козин Виктор Михайлович**, доктор технических наук, профессор по кафедре кораблестроения, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, 681005, Комсомольск-на-Амуре, ул. Metallургов 1, e-mail: kozinvictor@rambler.ru

**Viktor M. Kozin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Shipbuilding Department, Chief Researcher of the Laboratory of Problems of Creation and Processing of Materials and Products, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 681005, Komsomolsk-on-Amur, 1 Metallurgov st., e-mail: kozinvictor@rambler.ru

УДК 629.12.001.2  
Doi 10.37220/MIT.2020.48.2.040

## Численный анализ ударных давлений на борт при движении судна во льдах

В.Г. Бугаев<sup>1</sup>, В.В. Новиков<sup>1</sup>, К.А. Молоков<sup>1</sup>, Д.В. Славгородская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Дальневосточный федеральный университет

**Аннотация.** Вопросам прочности судов при эксплуатации во льдах в последнее время уделяется все больше внимания в связи возрастающим интересом к освоению Арктики. Несмотря на множество проведенных исследований, остаются не всегда ясными и трудно определяемыми величина и характер ударных контактных давлений на корпус, что связано со сложным процессом соударения льда и корабля, зависящим от многочисленных факторов. В этой связи, важным является накопление и систематизация результатов исследований. В данной работе проведен расчетный анализ ударного воздействия льда на корпус ледокола, показано, как изменяются амплитуда, длительность и форма ударного импульса. Выполнена оценка напряжений, перемещений и деформаций, возникающих в процессе смятия и изгиба ледовой пластины, контактных давлений в зависимости от скорости соударения, массы, толщины и конфигурации льдины, а также от углов наклона борта к вертикали и ватерлинии к диаметральной плоскости. Исследование проведено при рассмотрении процесса удара на 3D-модели корпуса и аналитическим методом. Сравнение результатов анализа численного моделирования и аналитических расчетов показывают достаточно хорошую их сходимость. Картина взаимодействия корпуса судна со льдом, а также численные значения параметров (ударного импульса, состояния льда) свидетельствуют о пригодности нелинейного динамического исследования на этапе проектирования и инженерного анализа формы корпуса судна. Полученные данные о количественном влиянии рассмотренных параметров на интенсивность ударного давления могут быть учтены при разработке судовой поверхности ледокольных судов на начальной стадии проектирования, а также при составлении ледовых паспортов.

**Ключевые слова:** контактное давление, импульс удара, форма корпуса, ледокол, 3D-моделирование

## Numerical analysis of impact pressures on board during vessel movement in ice

Victor G. Bugaev<sup>1</sup>, Valery V. Novikov<sup>1</sup>, Konstantin A. Molokov<sup>1</sup>, Daria V. Slavgorodskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Far Eastern Federal University

**Abstract.** Recently, more and more attention has been paid to the issues of ship durability during operation in ice due to the growing interest in the development of the Arctic. Despite the many studies performed, the magnitude and nature of impact contact pressures on the hull are not always clear and difficult to determine, which is associated with the complex process of collision of ice and the ship, depending on numerous factors. In this regard, the accumulation and systematization of research results is important. In this work, we performed a calculation analysis of the impact of ice on the icebreaker's hull, showing how the amplitude, duration and shape of the shock pulse change. The stresses, displacements, and deformations arising during the crushing and bending of the ice plate, the contact pressures depending on the impact speed, mass, thickness and configuration of the ice floe, as well as on the angles of inclination of the bead to the vertical and the waterline to the diametrical plane, were estimated. The study was conducted when considering the impact process on a 3D model of the body and the analytical method. Comparison of the results of the analysis of numerical simulation and analytical calculations show a fairly good convergence. The picture of the interaction of the ship's hull with ice, as well as the numerical values of the parameters (shock pulse, ice state) indicate the suitability of nonlinear dynamic research at the stage of design and engineering analysis of the shape of the ship's hull. The obtained data on the quantitative influence of the considered parameters on the pressure intensity can be taken into account when developing the ship surface of icebreaking vessels at the initial design stage, as well as when compiling ice certificates.

**Keywords:** contact pressure, impact impulse, hull shape, icebreaker, 3D-modeling

### Введение

Величина ледовых нагрузок на корпус при движении судна в условиях ледовой обстановки зависит от многих факторов. Основными из них являются свойства и параметры льда, скорость движения и характеристики судна [1], [5], [6]. Опыт эксплуатации указывает на повышенную повреждаемость носового района корабля, более подверженного ударам о льдины, и уменьшение объема повреждений в корме [2], [9] в соответствии с распределением ледовых воздействий на корпус (рис. 1, 2). Сочетание ударных нагрузок и низких температур многократно увеличивает вероятность зарождения хрупких трещин и снижение эксплуатационного ресурса конструкций [14].

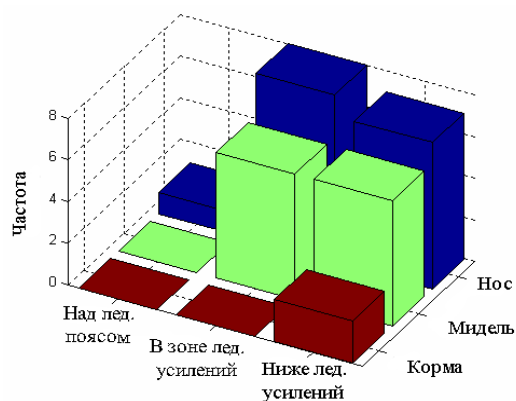


Рис. 1. Распределение ледовых повреждений по корпусу судна [9]



Рис. 2. Пример повреждения носовой оконечности от взаимодействия судна с дрейфующими льдинами [9]

Уменьшение повреждаемости достигается совершенствованием обводов корпуса, подкреплением конструкций и соблюдением правил эксплуатации во льдах. При проектировании судовой поверхности судов ледового класса необходимо учитывать и величину, и характер ледовых нагрузок. Поэтому актуальными являются анализ и систематизация информации о влиянии различных параметров и факторов на ударное давление льда на корпус движущегося судна. Целью данного исследования является изучение взаимодействия корпуса ледокольного судна в его носовой оконечности со льдом и оценка величины контактных усилий на борт.

Расчетные методики строительной механики корабля построены с учетом принятия определенных допущений [3],[4],[8] и др. Например, судно рассматривается как твердое тело; силы сопротивления воды, вызванные перемещениями судна и льдины во время удара, считаются малыми по сравнению с контактными усилиями; перемещения судна и льдины в процессе удара малы; податливость борта о льдину не учитывается, а удар судна о льдину считается неупругим, поскольку в процессе удара происходит дробление льда и пр.

Методы, основанные на применении современных информационных технологий, в частности, систем инженерного анализа (CAE-систем), дают возможность смоделировать относительно точно процесс соударения корпуса судна со льдом и позволяют учесть многофакторный комплекс разных параметров [7] и др. В то же время они также предполагают принятие некоторых допущений (например, условное закрепления исследуемых конструкций и льда и пр.).

Ниже представлен расчетный анализ контактных нагрузок для ледокола во время удара корпуса о льдину, проведенный с использованием 3D-моделирования и - по методике строительной механики корабля [3]. Объектом исследования является ледокольное судно Icebreaker5 водоизмещением 10870 т.

### 3D-моделирование и численное решение задачи

**Цель:** исследование взаимодействия корпуса судна со льдом, определение нагрузок, возникающих при ударе корпуса о лед.

### Задачи исследования:

1. Определение амплитуды, длительности и формы ударного импульса при взаимодействии носовой оконечности корпуса судна со льдом (при движении судна в мелко- и крупнобитых льдах).

2. Определение напряжений, перемещений и деформаций, возникающих в льдине в процессе ее смятия, изгиба и разрушения.

Решение задачи осуществляется с помощью модуля Simulation SolidWorks как нелинейное динамическое исследование.

### Физико-механические характеристики льда

На данном этапе исследования нас в большей степени интересуют такие свойства льда, как пределы прочности на изгиб  $\sigma_r$ , сжатие  $\sigma_{сж}$  и срез  $\tau_r$ , плотность и фрикционные характеристики.

Предел прочности на изгиб  $\sigma_r$  составляет  $0,25 \div 0,27$  МПа, для прочных зимних льдов –  $0,49 \div 0,67$  МПа, очень прочных - до 0,78 МПа.

Прочность льда на сжатие  $\sigma_{сж}$  составляет  $2,3 \div 2,6$  МПа, для прочных зимних льдов –  $3,9 \div 4,9$  МПа, очень прочных - до 20,0 МПа.

Судно рассматривается как податливое упруго-пластичное твердое тело управляемой жесткости. Удар корпуса о льдину считается упруго-пластичным, поскольку в процессе удара происходит смятие кромки льда и деформация конструкций. Податливость борта во время исследований можно изменять в достаточно широких пределах.

Пятно контакта в момент удара принимает форму вытянутого эллиптического сегмента, размеры которого (около  $3,0 \times 0,4$  м) зависят от формы поверхности корпуса судна и глубины проникновения борта в лед.

Удар осуществляется под углом  $60^\circ$  к ДП на уровне ледовой ватерлинии в районе 3 теоретического шпангоута (углы  $\alpha_{шпз} = 20$  град,  $\beta_{шпз} = 35$  град).

Скорость соударения  $v = 3, 4, 5$  м/с. Льдина имеет закругленную по радиусу  $R = 25$  м кромку. Ее масса составляет  $m = 70$  т.

На рисунке 3 приведена 3D-модель контакта носовой оконечности судна и льдины.

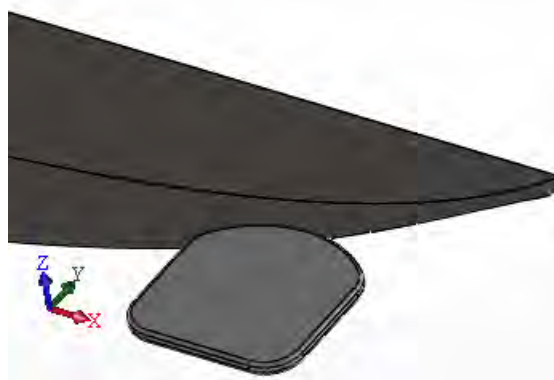


Рис. 3. 3D-модель корпуса судна и льдины в районе контакта

**Крепление.** Корпус считается жестко зафиксированным в ДП и поперечном сечении в районе центра тяжести судна. Возможно симметричное закрепление в ДП.

Сетка: несовместная, тип - на твердом теле, разбиение – на основе кривизны, максимальный размер элемента – 489,4 мм, минимальный размер элемента – 24,5 мм, качество - высокое; всего узлов – 60331, всего элементов – 30569.

**Результаты расчетов**

**Силы реакции.** При ударе корпуса судна о лед возникают результирующая сила реакции (контакта), направленная по нормали к поверхности, и её составляющие по осям X, Y и Z. Максимальная сила реакции, приложенная к перекрытию со стороны льда (при скорости соударения  $v=3$  м/с), достигает значения  $1,45 \cdot 10^6$  Н в момент ударного импульса 0,10 с. Форма ударного импульса указывает на относительно жесткий удар (рис. 4). Продолжительность удара составляет более 0,5 с.

Сила реакции, направленная по оси X, отталкивает льдину в направлении движения судна и одновременно создает дополнительное сопротивление; сила реакции по оси Y вызывает деформацию корпуса и льдины, а по оси Z - приводит к притапливанию и изгибу льдины.

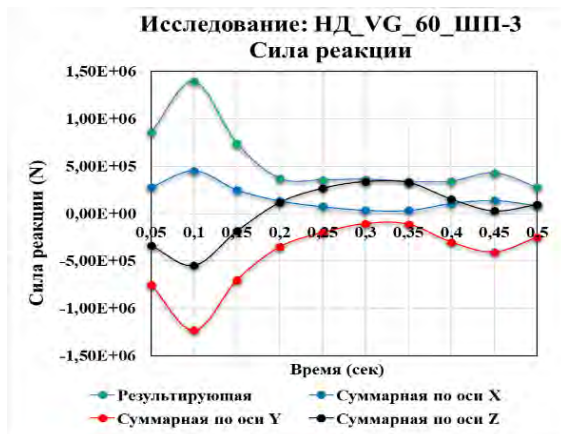
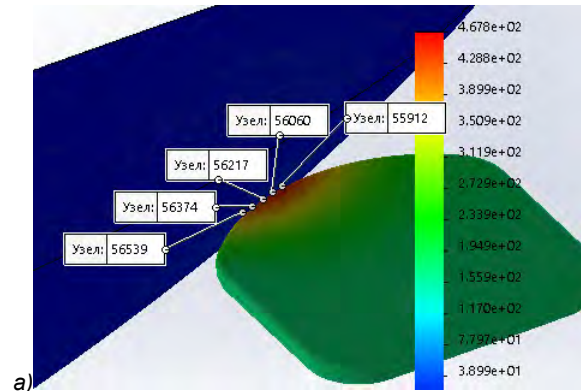


Рис. 4. Результирующая сила реакции бортового перекрытия и её составляющие по осям X, Y и Z

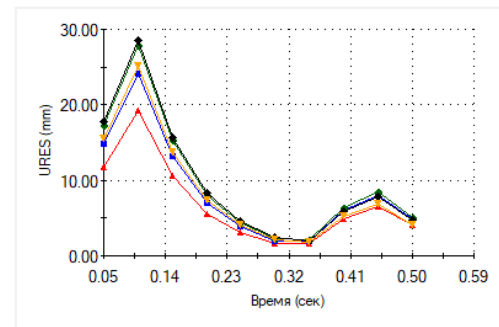
Также выполнены исследования зависимости максимальной силы реакции и её составляющих от скорости соударения ( $v = 2, 3, 4$  м/с) корпуса судна со льдом. На рисунке 17 приведена зависимость максимальной силы реакции от скорости соударения и её сравнение с результатами аналитического решения задачи.

**Податливость борта.** Картина взаимодействия корпуса судна со льдом и график перемещений узловых точек борта на уровне ледовой ватерлинии показаны на рисунке 5.

Бортовое перекрытие судна в районе 3 теоретического шпангоута обладает достаточно высокой жесткостью, и в процессе удара вминается на глубину 28 мм. Следует отметить, что податливость борта можно изменять в процессе моделирования и таким образом оценить ее влияние на ледовые нагрузки и продолжительность удара.



а) Название исследования: НД\_VG\_60\_Шп-3 (По умолчанию) Тип эпюры: Нелинейное перемещение Перемещение 1



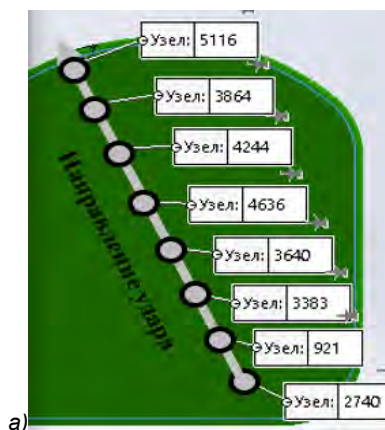
б)

Рис. 5. Податливость борта: а) картина взаимодействия корпуса судна со льдом; б) график перемещений борта в процессе удара

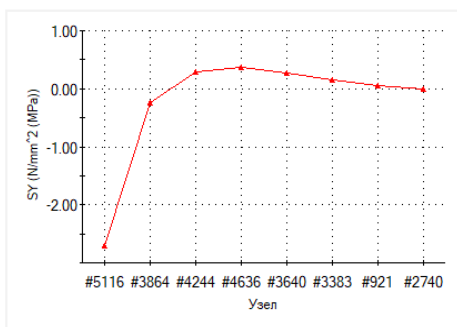
**Напряжения в льдине.** В наибольшей степени нас интересует оценка напряжений по von Mises и нормальных напряжений по осям Y и Z. На рисунке 6 приведены графики нормальных напряжений сжатия/растяжения в верхней и нижней гранях льдины (в момент времени 0,1 с) при её деформировании и разрушении изгибом.

При взаимодействии с наклонным бортом судна сжатию подвергаются в основном нижние слои льда и часть верхних, непосредственно примыкающих к борту, а растяжению – удаленные от борта верхние слои. Одновременно с этим возникает сдвиг по слоям и появляются трещины, что сложно оценивать при численном и аналитическом решении задачи.



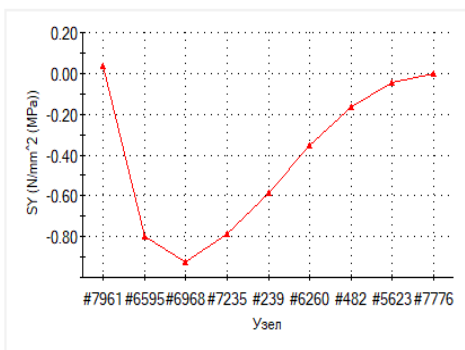


а) Название исследования: HD\_VG\_60\_Шп-3(-По умолчанию-) Тип эпюры: Нелинейное узловое напряжение Напряжение1 Шаг эпюры: 2 время: 0.1 Секунды



б)

Название исследования: HD\_VG\_60\_Шп-3(-По умолчанию-) Тип эпюры: Нелинейное узловое напряжение Напряжение1 Шаг эпюры: 2 время: 0.1 Секунды

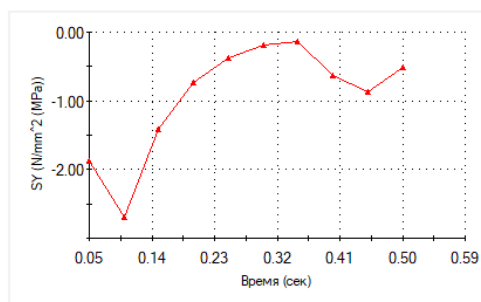


в)

Рис. 6. Напряжения в льдине по оси Y в момент времени 0,1 с: а) направление удара; б) верхняя грань; в) нижняя грань

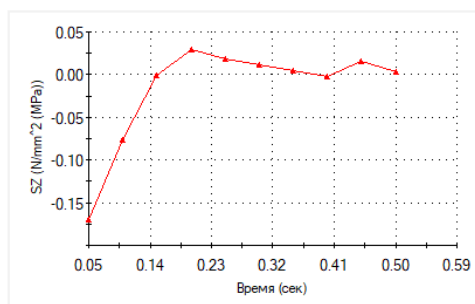
Зависимости изменения нормальных напряжений (в процессе удара) в наиболее нагруженном участке льдины (узел 5116) приведены на рисунке 7.

Название исследования: HD\_VG\_60\_Шп-3(-По умолчанию-) Тип эпюры: Нелинейное узловое напряжение Напряжение1



а)

Название исследования: HD\_VG\_60\_Шп-3(-По умолчанию-) Тип эпюры: Нелинейное узловое напряжение Напряжение1



б)

Рис. 7. Нормальные напряжения в верхней грани льдины (узел 5116): а) по оси Y; б) по оси Z

Прочность льда на изгиб много меньше (в 5 и более раз) прочности на сжатие. Условие прочности можно записать в виде:

$$\sigma_p^c \leq [\sigma_p^c],$$

где  $\sigma_p^c$ ,  $[\sigma_p^c]$  – расчетные и допускаемые напряжения на растяжение/сжатие соответственно, МПа.

В нашем исследовании напряжения растяжения/сжатия на определенных участках в верхней (до узла 4244) и нижней (до узла 6595) гранях льдины превышают допустимые значения. Принимая в качестве допустимых напряжения  $[\sigma_p] = 0,40$  МПа и тот факт, что перемещения по оси z достигают значений более 600 мм, можно предположить, что льдина в рассматриваемом примере разрушается при изгибе.

### Перемещения (деформация) льдины

Таким образом, при ударе корпуса судна о лед происходит смятие кромки льдины под действием горизонтальной составляющей контактного усилия и ее изгиб (и разрушение) под действием вертикальной составляющей (рис. 8, 9).

Глубина смятия кромки льда в процессе удара составляет:

$$f_y = f_y^l - f_y^b = 146 - 28 = 118 \text{ мм,}$$

где  $f_y^b$  – перемещение борта в направлении оси Y, мм;  $f_y^l$  – перемещение кромки льдины в направлении оси Y, мм.

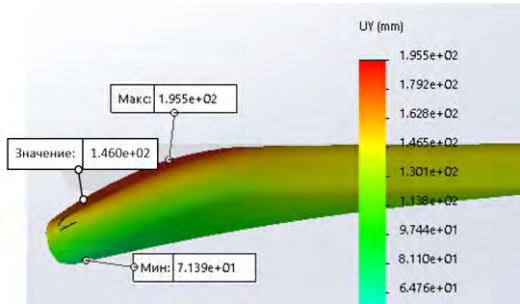
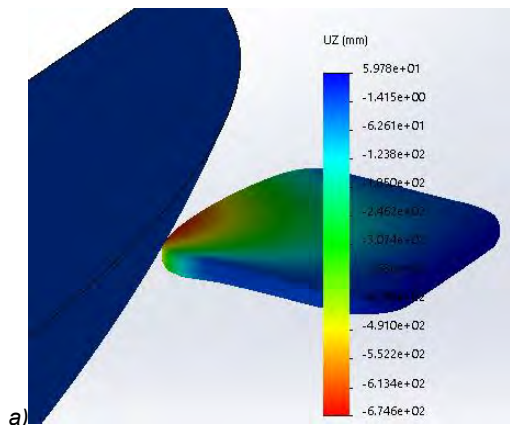
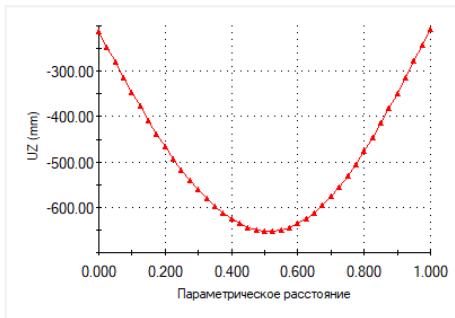


Рис. 8. Изгиб и смятие льда в процессе удара

**Изгиб.** Наибольшие перемещения наблюдаются по оси z и связаны с изгибом и притапливанием льда. На рисунке 9 в качестве примера показаны эпюра и графики перемещений участков в льдине в вертикальном направлении.



а) Название исследования: НД\_VG\_60\_Шп-3 (По умолчанию) Тип эпюры: Нелинейное перемещение Перемещение 1



б)

Рис. 9. Перемещение кромки льдины в зоне контакта с корпусом: а) эпюра перемещений; б) распределение перемещений по длине кромки

Стрелка прогиба верхней кромки льда  $f_z^l$  по оси z составляет более 600 мм в момент времени 0,23 с. Одновременно с изгибом и притапливанием происходит незначительное скручивание льдины в период удара 0,15÷0,23 с.

Вертикальное усилие, разрушающее лед

изгибом, определяется по формуле [3]:

$$P_p = 0,52 \sigma_p^2 h^2 = 0,52 \cdot 0,4 \cdot 0,82 = 0,133 \text{ МН,}$$

где  $h$  – толщина льда, м;  $\sigma_p$  – предел прочности льда на изгиб, МПа.

Анализ результатов моделирования показывает, что процесс удара условно можно разделить на три этапа:

**Первый этап** (0,0 ÷ 0,10 с). Наблюдается резкое возрастание силы реакции и напряжений, возникающих в льдине, до максимальных значений. Одновременно происходит смятие кромки и начало изгиба льда, продолжающееся до 0,23 с.

**Второй этап** (0,10 ÷ 0,23 с). Продолжается изгиб пластины льда до максимальных значений, одновременно с этим происходит дальнейшее смятие кромки. Четкой границы между разрушенным льдом и основной массой не наблюдается, однако выделяется зона повышенной деформации и удельной энергии деформации разрушения льда.

**Третий этап** (0,23 ÷ 0,50 с). На этом этапе заканчивается процесс пластических деформаций и разрушения (смятия) льда.

**Расчетная оценка контактных давлений о льдину при движении ледокола**

**Расчетные предпосылки.** В районе контакта борта судна со льдом сначала происходит местное смятие верхней кромки льда, после чего ледяной покров разрушается от изгиба (рис. 10).

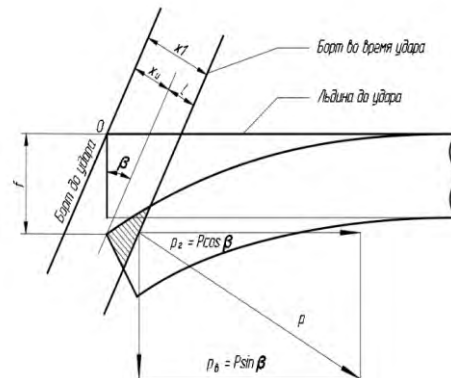


Рис. 10. Схема удара о борт с учетом изгиба льдины согласно [3]

При этом величина и характер действующих контактных усилий, размеры зон смятия кромки льда, а также секторов выламываемых каждым бортом от форштевня до кромки неразрушенного ледяного покрова, зависят от толщины, прочности льда, формы обводов корпуса и скорости движения ледокола [11]. Предлагаемые в [3] методика и зависимости основаны на рассмотрении кинетической энергии судна в направлении удара, включающей в себя работу сил смятия льда и потенциальную энергию деформации изгиба полубесконечной ледяной пластины в конце удара. Глубина смятия и величина максимального контактного усилия, возникающего при ударе судна о кромку ледяного поля с учетом изгиба ледяного покрова, рассчитываются по формулам:

$$\zeta_{max} = \left( \frac{M_{1л} v^2}{\frac{2\sigma_c A}{a+1} + \frac{\sigma_c^2 A^2 \sin^2 \beta}{2\sqrt{\gamma D}}}_{a+1} \right)^{\frac{1}{a+1}} \text{ и } P_{max} = \frac{4}{3} \frac{\sigma_c \sqrt{2R}}{\sin \beta \cos^2 \beta} \zeta_{max}^{\frac{3}{2}} \cdot (1)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$M_{in}$  - приведенная масса корпуса судна;  $v$  - скорость движения судна;  $\zeta_{max}$  - максимальная глубина смятия льда при ударе;  $P_{max}$  - максимальное контактное усилие при ударе о льдину;  $\beta$  - угол наклона касательной к борту в точке удара по отношению к вертикали;  $A, a$  - коэффициенты, зависящие от геометрических параметров судна и льдины;  $D$  - водоизмещение судна;  $\sigma_c$  - предел прочности льда на смятие;  $\gamma$  - удельный вес льда.

Кроме того, в расчетах используются цилиндрическая жесткость льдины, ее масса, толщина и параметры, характеризующие форму корпуса для рассматриваемого теоретического шпангоута в районе удара.

Не приводя всех достаточно громоздких расчетных формул и последовательность расчета по ним, отметим, что необходимо рассматривать два случая удара судна о кромку ледяного покрова, поскольку эффект от ударного воздействия при этом обнаружен разным. Первый случай - когда корпус ударяется о льдину с закругленной кромкой, второй - о льдину с острым углом. Оба случая часто встречаются на практике [1]. Расчет максимальной глубины смятия и других параметров выполнялся с учетом изгиба льда и без него методом последовательных приближений с уточнением вводимых данных по разработанной программе Excel.

#### Влияние характеристик формы корпуса на величину ударных давлений

Углы наклона шпангоутов к вертикали, а также углы между нормалью к борту в точке удара и направлением движения в носовой оконечности вводились в расчет по замерам на теоретическом чертеже судна. Построенная по результатам расчета трехмерная диаграмма позволяет визуально проследить изменение ударного контактного усилия для льда с разной толщиной при изменении углов наклона борта судна (рис. 11). Рост давления при увеличении толщины льда происходит интенсивно. Так, при увеличении толщины льда от 0,5 м до 1,5 м контактное усилие возрастает более чем в 2,0 раза. При меньших углах наклона ударное давление растет и тем больше, чем толщина льда. Например, уменьшение угла  $\beta$  на  $8^\circ$  приводит к увеличению усилия  $P_{max}$  на 10 - 30% в зависимости от толщины льдины. Таким образом, увеличение угла наклона борта на один градус способствует уменьшению контактного давления на  $\sim 1 \dots 4\%$ .

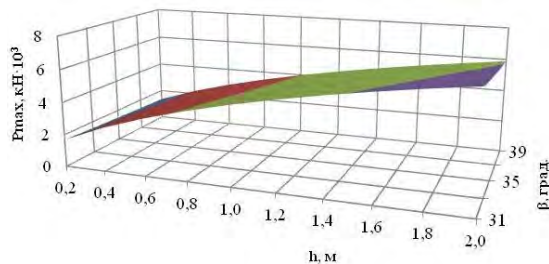


Рис. 11. Максимальные контактные усилия при столкновении корпуса и льдины со скругленной кромкой при изменении ее толщины  $h$  и угла наклона борта к вертикали  $\beta$  в точке удара в районе 3 теоретического шпангоута

Углы наклона шпангоута  $\beta$  к вертикали и ватерлинии к диаметральной плоскости по длине судна с изменением обводов изменяются. Каждый из них в разной степени оказывает влияние на величину контактного давления льда. По результатам расчета уменьшение контактных давлений при увеличении угла наклона ватерлинии на  $\sim 7^\circ$  при  $\beta = const$  может составлять более 25% (рис. 12). В то же время сопротивление движению судна возрастет, поэтому при разработке судовой поверхности необходимо принимать компромиссное решение.

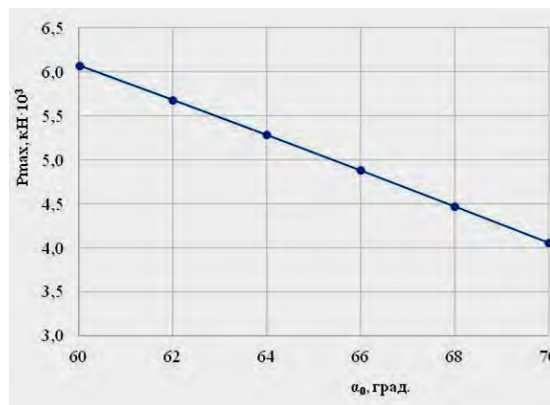


Рис. 12. Зависимость величины контактных давлений от угла наклона ватерлинии ( $\alpha_0$  - угол между нормалью к касательной к ватерлинии в точке удара и направлением движения)

Ледяное поле при ударе корпуса судна сминается и, изгибаясь, разрушается. В зависимости от толщины льда степень его изгиба и, соответственно, ударные контактные усилия будут различными. Если лед разрушается без изгиба, величина  $P_{max}$  в носовой оконечности по результатам расчета - в  $\sim 1,5-2,5$  раза больше, чем при его изгибе (рис. 13). Для более тонкого льда с меньшей изгибной жесткостью контактные усилия уменьшаются примерно прямо пропорционально уменьшению его толщины.

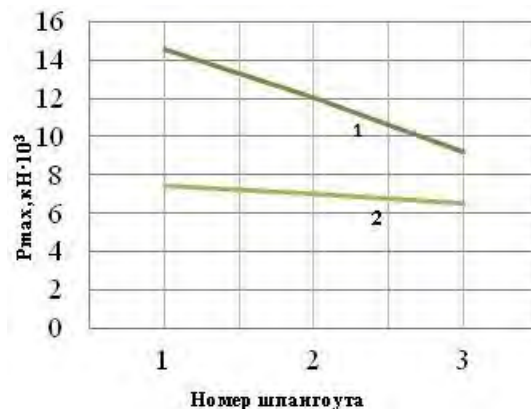


Рис. 13. Максимальные контактные усилия в носовой оконечности при движении судна со скоростью 6 уз.: 1- в случае смятия ледяного поля без изгиба; 2- в случае изгиба ледяного поля с последующим разрушением (толщина льда  $h=1,5$  м)

#### Влияние скорости судна на параметры соударения корпуса и льдины

При ударе льдины о борт происходит смятие льда и его разрушение, после чего давление  $P_{max}$



передается некоторое время  $t$  на корпус по линии контакта льдины  $b_0$ . Эти параметры зависят от массы, конфигурации и механических характеристик льда, формы корпуса, скорости движения судна и пр.

Проследим влияние отмеченных параметров на рассматриваемом примере удара корпуса ледокола о льдину для обоих случаев конфигурации льдины с учетом приведенных в [3] приближенных зависимостей:

для льдины с закругленной кромкой

$$\zeta_{\max} = \left( \frac{5 M_n \cdot v_n^2}{4 \sigma_c \cdot A} \right)^{\frac{2}{5}} \text{ и } P_{\max} = 1,14 (M_n \cdot v_n^2)^{\frac{3}{5}} \cdot (A \cdot \sigma_c)^{\frac{2}{5}}; (2)$$

для льдины с угловой кромкой

$$\zeta_{\max} = 1,15 \left( \frac{M_n \cdot v_n^2}{\sigma_c \cdot A} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ и}$$

$$P_{\max} = 1,31 (M_n \cdot v_n^2)^{\frac{2}{3}} \cdot (A \cdot \sigma_c)^{\frac{1}{3}}. (3)$$

При выводе формул (2), (3) борт судна принимался абсолютно жестким, а податливость льда не учитывалась. Пренебрежение упругими деформациями несколько завышает величину контактных усилий.

На рис.14-16 представлены результаты расчета максимальных контактных давлений, глубины смятия льда, времени соударения и длины контакта при ударе льдины в районе 3 теоретического шпангоута.

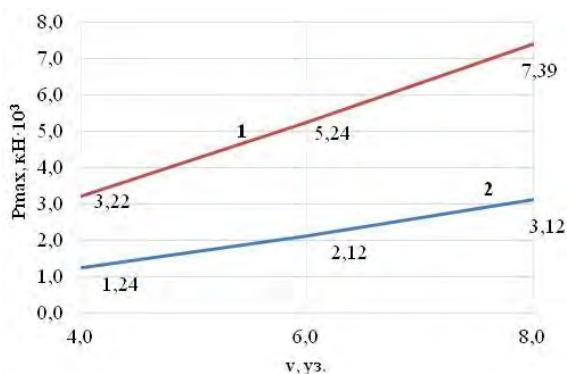


Рис. 14. Изменение контактных давлений  $P_{\max}$  при движении судна: 1- для льдины с закругленной кромкой; 2- для льдины с угловой кромкой

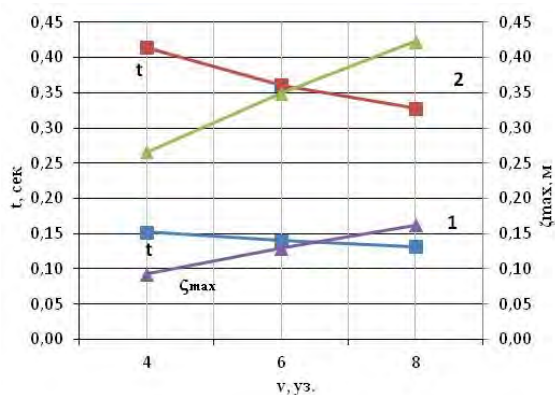


Рис. 15. Диаграмма изменения глубины смятия  $\zeta_{\max}$  и времени соударения  $t$  от скорости движения судна: 1- для льдины с закругленной кромкой; 2- для льдины с угловой кромкой

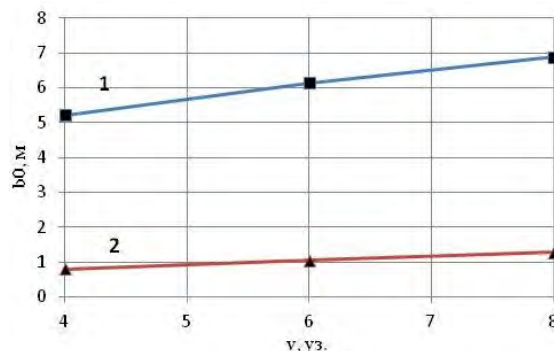


Рис. 16. Изменение линии контакта льда  $b_0$  с корпусом во время удара при движении судна: 1- для льдины с закругленной кромкой; 2- для льдины с угловой кромкой

Графические зависимости показывают, что с увеличением скорости судна в два раза максимальное контактное давление на корпус и глубина смятия льда в рассматриваемом диапазоне скоростного режима (от 4 уз. до 8 уз.) возрастают приблизительно в 1,5-2 раза. При встрече судна с льдиной, у которой кромка закруглена, данные параметры оказываются более, чем в 2 раза выше, чем для льда с заостренным очертанием кромки. В то же время продолжительность соударения, наоборот, для угловой кромки - больше (в ~2,5 раза), хотя ее уменьшение с ростом скорости невелико, что было отмечено в [3].

На рисунке 17 приведена зависимость максимальной силы реакции при ударе судна о льдину массой 70 т от скорости соударения и её сравнение с результатами аналитического решения задачи. С увеличением скорости соударения расхождение максимальных сил реакции возрастает от 0% (2 м/с) до 10% (4 м/с). Значительное расхождение при больших скоростях можно объяснить, во-первых, учетом при численном моделировании податливости борта и, во-вторых, большей продолжительностью ударного импульса.



Рис. 17. Зависимость максимальной силы реакции от скорости соударения

Исследовалось также, как влияет масса льдины на характеристики соударения. Оказалось, что увеличение массы льдины в 10 раз (например, от 70 т до 700 т) при скорости движения ледокола 6 уз приводит к росту ударного давления, глубины смятия, а также времени соударения в 3,8-4,4 раз.

Очевидно, что интенсивность давлений при ударе для льдины с угловой кромкой получится больше,



чем для льдины с плавными очертаниями, хотя по абсолютной величине – наоборот. Для льдины с заостренной кромкой длина зоны контакта  $b_0$  - в 6-8 раз меньше. (см. рис.16). Поэтому случай льдины с угловыми очертаниями представляется достаточно опасным, что отмечалась также в [1]. Характеристикой ледового воздействия, более объективной, кроме импульса удара, может служить интенсивность контактного давления, полученная перестроением диаграммы  $P_{max}$  с учетом линии соприкосновения льда с корпусом  $b_0$  (рис. 18).

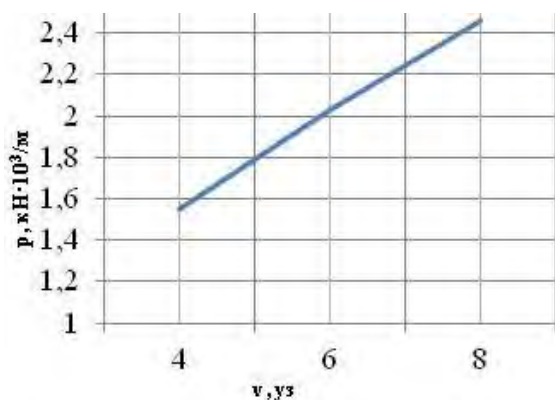


Рис. 18. Интенсивность контактных давлений

Расчетные значения интенсивности, подобные этой зависимости при сопоставлении с рекомендуемыми «Правилами ...» [10] могут служить дополнительными критериями по оценке допустимых давлений и скоростей движения ледокола в ледовых паспортах.

### Заключение

Существенным преимуществом численного

моделирования ледовых нагрузок является возможность количественной и качественной оценки амплитуды, длительности и формы ударного импульса, напряженно-деформированного состояния конструкций, что трудно реализовать с помощью традиционных методов. Сравнение результатов численного моделирования и аналитических исследований указывает на их достаточно хорошую сходимость.

Картина взаимодействия корпуса судна со льдом, а также численные значения параметров (ударного импульса, состояния льда) свидетельствуют о пригодности нелинейного динамического исследования на этапе проектирования и инженерного анализа формы корпуса судна. Адекватность модели зависит от физико-механических характеристик льда, условий взаимодействия корпуса судна со льдом, коэффициентов демпфирования, а также от размеров сетки и типа конечных элементов. Строго говоря, выбор формы корпуса судна необходимо выполнять также с учетом его ходкости как на чистой воде, так и во льдах, что является весьма сложной задачей.

Выполненный аналитический расчет иллюстрирует количественную оценку контактных давлений на корпус ледокола при ударах о лед. Полученные результаты позволяют оценить влияние скорости движения, параметров льдины, характеристик формы носовой оконечности на контактное ударное давление и величину его интенсивности. Результаты исследования могут быть учтены при проектировании судовой поверхности ледокольных судов на начальном этапе их конструирования. Расчетные значения интенсивности могут служить дополнительными критериями по оценке допустимых давлений и скоростей движения ледокола при разработке ледовых паспортов.

### Литература

1. Абоносимов В.И. Искусство ледового плавания. – Владивосток: Издательство Приморского полиграфкомбината. 2002. - 798 с.
2. Апполонов Е.М. Предельная прочность арктических судов: –СПб.: Крыловский государственный научный центр. 2014. – 244 с.
3. Попов Ю.Н. Прочность судов, плавающих во льдах / Попов Ю.Н., Фаддеев О.В., Хейсин Д.Е., Яковлев А.А. –Л: Судостроение. 1967. -222 с.
4. Курдюмов В.А., Хейсин Д.Е. К определению ледовых нагрузок, действующих на корпус ледокола при ударе. Труды ЛКИ. -Л.: 1974. Вып.90. С. 51-59.
5. Кулеш В.А., Огай С.Н., Войлошников М.В. Безопасность и эффективность эксплуатации судов во льдах. Морские интеллектуальные технологии. Научный журнал №1. Спецвыпуск. 2013. С.11-20.
6. Ионов Б.П. Проектирование ледоколов: монография /Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов, В.А. Зуев. –СПб.: Судостроение. 2013. – 512 с.
7. Лобанов В.А. Оценка местной ледовой прочности корпуса судна численными методами. Электронный журнал № ФС77-39410. №3. 2010.
8. Платонов В. В., Тряскин В. Н. Методические основы определения расчетных ледовых нагрузок на корпус современных судов ледового плавания в носовом и кормовом районах // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 4 (36). С. 83—98.
9. Valdez Banda, O.A., F. Goerlandt, J. Montewka & P. Kujala (2015), Winter navigation at the Baltic Sea: An analysis of accidents occurred during winters 2002-2003 & 2009-2013. Finland, Espoo: Aalto University, Department of Applied Mechanics. In: Nowakowski et al. (2015), Safety and Reliability: methodology and application. London: CRC Press. P. 83-92.
10. Правила классификации и постройки морских судов. Российский Морской Регистр Судоходства. – СПб.: 2020.
11. Каштелян В.И, Позняк И.И., Рывлин А.Я. Сопротивление льда движению судна. –Л: Судостроение. 1968. - 236 с.
12. Справочник по строительной механике корабля: -Л: Судостроение. 1982.

13. Бугаев В.Г., Славгородская Д.В. Анализ прочности корпуса судна при ударе об лед. Морские интеллектуальные технологии. Научный журнал. 2018. №3 (41). Т.1. С.62-68.
14. Молоков К.А., Домашевская Я.Р. Оценка ресурса сварных соединений из феррито-перлитных материалов в условиях низких температур.-Владивосток: ДВФУ. Полярная механика. №3. 2016. С. 618-628.

#### References

1. Abonosimov V.I. Iskusstvo ledovogo plavaniya [The art of ice swimming]. Vladivostok: Izdatel'stvo Primorskogo poligrafkombinata. 2002. - 798 s.
2. Appolonov E.M. Predel'naja prochnost' arkticheskikh sudov [Ultimate strength of Arctic vessels]: SPb.: Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj centr. 2014. 244 s.
3. Popov Ju.N. Prochnost' sudov, plavajushih vo l'dah [The strength of ships floating in ice] Popov Ju.N., Faddeev O.V., Hejsin D.E., Jakovlev A.A. L: Sudostroenie. 1967. 222 s.
4. Kurdjumov V.A., Hejsin D.E. K opredeleniju ledovyh nagruzok, dejstvujushih na korpus ledokola pri udare [To the determination of ice loads acting on the icebreaker hull upon impact]. Trudy LKI. L.: 1974. Vyp.90. S. 51-59.
5. Kulesh V.A., Ogaj S.N., Vojloshnikov M.V. Bezopasnost' i jeffektivnost' jekspluatacii sudov vo l'dah [Safety and operational efficiency of ships in ice]. Morskie intellektual'nye tehnologii. Nauchnyj zhurnal №1. Specvypusk. 2013. S.11-20.
6. Ionov B.P. Proektirovanie ledokolov [Design of icebreakers]: monografija B.P. Ionov, E.M. Gramuzov, V.A. Zuev. SPb.: Sudostroenie. 2013. 512 s.
7. Lobanov V.A. Ocenka mestnoj ledovoj prochnosti korpusa sudna chislennymi metodami [Assessment of the local ice strength of the hull by numerical methods]. Jelektronnyj zhurnal № FS77-39410. №3. 2010.
8. Platonov V. V., Trjaskin V. N. Metodicheskie osnovy opredelenija raschetnyh ledovyh nagruzok na korpus sovremennyh sudov ledovogo plavaniya v nosovom i kormovom rajonah [Methodological foundations for determining design ice loads on the hull of modern ice navigation vessels in the bow and stern areas] Arktika: jekologija i jekonomika. 2019. № 4 (36). S. 83-98.
9. Valdez Banda, O.A., F. Goerlandt, J. Montewka & P. Kujala (2015), Winter navigation at the Baltic Sea: An analysis of accidents occurred during winters 2002-2003 & 2009-2013. Finland, Espoo: Aalto University, Department of Applied Mechanics. In: Nowakowski et al. (2015), Safety and Reliability: methodology and application. London: CRC Press. P. 83-92.
10. Pravila klassifikacii i postrojki morskih sudov [Rules for the classification and construction of ships]. Rossijskij Morskoj Registr Sudohodstva. SPb.: 2020.
11. Kashteljan V.I., Poznjak I.I., Ryvlin A.Ja. Soprotivlenie l'da dvizheniju sudna [The resistance of ice to the movement of the vessel]. L: Sudostroenie. 1968. 236 s.
12. Spravochnik po stroitel'noj mehanike korablja [Handbook of structural mechanics of the ship]: L: Sudostroenie. 1982.
13. Bugaev V.G., Slavgorodskaja D.V. Analiz prochnosti korpusa sudna pri udare ob led [Analysis of the strength of the hull upon impact on ice]. Morskie intellektual'nye tehnologii. Nauchnyj zhurnal. 2018. №3 (41). Т.1. С.62-68.
14. Molokov K.A., Domashevskaja Ja.R. Ocenka resursa svarnyh soedinenij iz ferrito-perlitnyh materialov v uslovijah nizkih temperatur [Estimation of the resource of welded joints from ferrite-pearlite materials at low temperatures]. Vladivostok: DVFU. Poljarnaja mehanika, №3. 2016. S. 618-628.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Виктор Григорьевич Бугаев**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры кораблестроения и океанотехники Дальневосточный федеральный университет, 690950, Владивосток, ул. Суханова, 8, e-mail: v\_bugaev@mail.ru

**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

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

**Дарья Владимировна Славгородская**, аспирант кафедры кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет, 690950, Владивосток, ул. Суханова, 8, e-mail: daria.lobanovskaya@gmail.com

**Victor G. Bugaev**, Dr.Sci.(Eng), Professor, Professor of the Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8, e-mail: v\_bugaev@mail.ru

**Valery V. Novikov**, Ph.D.(Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, Far Eastern Federal University 690950, Vladivostok, ul. Sukhanov, 8, E-mail: leka1551@rambler.ru

**Konstantin A. Molokov**, Ph.D.(Eng), assistant professor, assistant professor of the Department of Welding Engineering, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanov, 8, e-mail: spektrum011277@gmail.com

**Daria V. Slavgorodskaya**, Postgraduate Student of the Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanov, 8, e-mail: daria.lobanovskaya@gmail.com

УДК 629.5.015.4:621.791:539.9  
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.058

## Аналитический метод определения критической длины трещин в судовых конструкциях на основе структурно-деформационного анализа

К.А. Молоков<sup>1</sup>, А.И. Мамонтов<sup>1</sup>, В.В. Новиков<sup>1</sup>, А.П. Герман<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Дальневосточный федеральный университет

**Аннотация.** Возникновение и распространение трещин в судовых конструкциях во многом зависит от напряженного состояния элементов связей, характера действующих нагрузок и структурной поврежденности металла. Поэтому важным является установление аналитических зависимостей, позволяющих непосредственно, по данным структуры металла и механическим характеристикам, определить критические размеры макротрещины для нагрузок, соответствующих пределу выносливости. В статье приводятся примеры трещинообразования в конструкциях судов, статистика появления подобных повреждений, анализируются существующие представления и подходы к решению обозначенной проблемы. Исследованиями авторов установлено, что начальная стадия образования повреждений при циклических нагрузках провоцируется, как правило, концентрацией напряжений в связях при деградации механических свойств и структуры металла. Фрагментация структуры под циклическими нагрузками резко снижает пластичность области, примыкающей к вершине развивающейся макротрещины. Накопление односторонних пластических деформаций приводит к предельному состоянию пластичности этой области и лавинообразному, или ускоренному движению трещины. Установлено, что эта критическая область имеет взаимосвязь с диаметром зерна металла, характеристикой пластичности и критическим раскрытием трещины в ее вершине на пределе выносливости. На базе структурно-деформационного анализа и линейной механики разрушения разработана инженерная методика расчета ресурса. Получена простая аналитическая зависимость, позволяющая оценить критический размер макротрещины для феррито-перлитных сталей без использования известной Гриффитсовой формулы. Возможность количественной оценки критической длины трещины на пределе выносливости имеет ключевое значение для построения инженерных методик, позволяющих вести расчет ресурса конструкций объектов морской техники.

**Ключевые слова:** конструкция, длина трещины, математическая модель, циклические нагрузки, предел выносливости, сварные соединения, структурная поврежденность, феррито-перлитная сталь, критическая деформация.

## Analytical method for determining the critical crack length in ship structures based on structural-deformation analysis

Konstantin A. Molokov<sup>1</sup>, Andrey I. Mamontov<sup>1</sup>, Valery V. Novikov<sup>1</sup>, Andrey P. German<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Far Eastern Federal University

**Abstract.** The occurrence and propagation of cracks in ship structures largely depends on the stress state of the communication elements, the nature of the existing loads and the structural damage of the metal. Therefore, it is important to establish analytical relationships that allow, directly, according to the metal structure and mechanical characteristics, to determine the critical dimensions of macrocracks for loads corresponding to the endurance limit. The article provides examples of crack formation in ship structures, statistics on the occurrence of such damage, analyzes existing ideas and approaches to solving this problem. The authors found that the initial stage of damage formation under cyclic loads is provoked, as a rule, by the concentration of stresses in the bonds during the degradation of the mechanical properties and structure of the metal. Fragmentation of the structure under cyclic loads dramatically reduces the ductility of the area adjacent to the top of the developing macrocracks. The accumulation of one-sided plastic deformations leads to a limiting state of plasticity of this region and an avalanche-like or accelerated crack motion. It has been established that this critical region is interconnected with the grain diameter of the metal, the ductility characteristic, and the critical crack opening at its apex at the endurance limit. Based on structural-deformation analysis and linear fracture mechanics, an engineering methodology for calculating the resource has been developed. A simple analytical dependence is obtained, which allows one to estimate the critical size of macrocracks for ferritic-pearlitic steels without using the well-known Griffith formula.

The ability to quantify the critical crack length at the endurance limit is of key importance for constructing engineering methods that allow calculating the resource of structures of marine equipment.

**Keywords:** structure, crack length, mathematical model, cyclic loads, endurance limit, welded joints, structural damage, ferritic-pearlitic steel, critical deformation.

### Введение

Несмотря на многолетнее изучение особенностей напряженного состояния прерывистых связей и принятие конструктивных мер по их подкреплению, в судовых конструкциях появляется множество трещин, угрожающих прочности отдельных элементов и всего корпуса [1]. Трещины усталости зарождаются чаще всего в узлах с высокой

концентрацией напряжений. Как показывает практика, появление таких повреждений во многих случаях неизбежно, и нередко суда продолжают эксплуатировать, но когда длина трещины приблизится к некоторому критическому размеру  $L_{кр}$ , (рис. 1) вероятность не разрушения конструкции практически снижается до нуля. Эксплуатация с присутствием трещин может быть оправдана достаточно высокой пластичностью материала и тем,



что даже длинные трещины в некоторых условиях могут развиваться достаточно продолжительное время. После возникновения в концентраторе трещины, они могут переходить в категорию неразвивающихся, например, вследствие перераспределения напряжений, или по другим причинам [2], [3] и др.

Ниже на рисунках приведены примеры образования трещин в корпусах судов. На рис. 1,а показаны трещины, возникшие в бортовой обшивке непосредственно в зоне термического влияния (ЗТВ) сварного шва. Выше от него возникла усталостная трещина, зародившаяся от дефекта и термического влияния сварки. Ниже от шва трещина начала разветвление к сварному соединению. Возможно, она зародилась от технологического дефекта в обшивке судна и начала развиваться при вибрационной нагрузке. На рис. 1,б видна трещина, вызванная подобного рода дефектом, возникшим в поле остаточных сварочных напряжений (ОСН) после термического влияния в результате действия вибрационных и основных нагрузок.

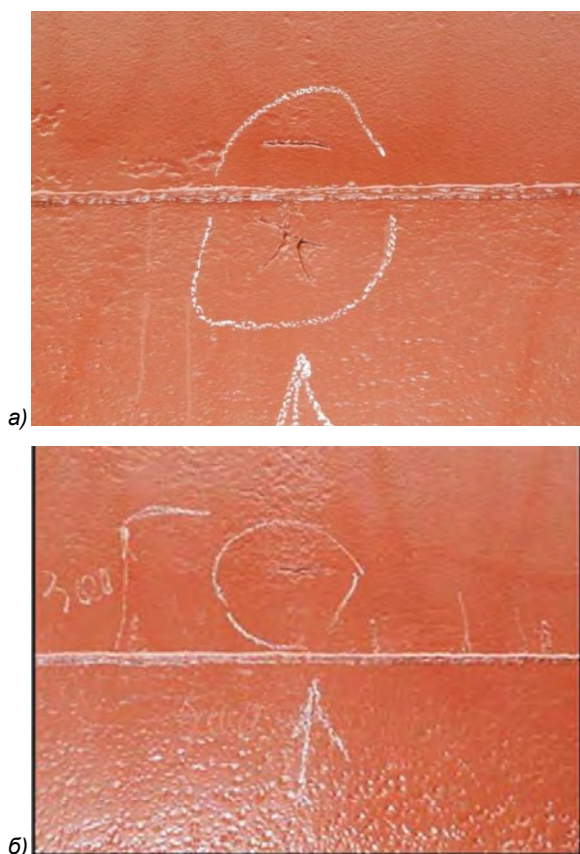


Рис. 1. Ветвистые трещины в наружной обшивке в ЗТВ сварных соединений т/х «Ладога» [1]

Разрушение может оказаться катастрофическим в тех случаях, когда трещина достигает своего нестабильного размера, а часть нагрузки не может быть перераспределена по элементам, обеспечивающим высокую статическую неопределимость (рис. 2).



Рис. 2. Трещина в палубе надстройки корабля, возникшая во время сильного шторма [4]

По данным А.Е. Антонио на танкерах усталостные трещины часто возникали в продольных переборках и бортах, а длина около 30% и 60% обнаруженных трещин не превышала 100 мм и 300 мм, соответственно. При этом скорость их распространения иногда достигала ~250 мм/год. Обобщая данные исследования за период 22 года эксплуатации танкера, заключаем, что в корпусе возникло в общей совокупности до 2000 трещин разной длины.

Практика эксплуатации показывает, что при использовании современных марок сталей для корпусов судов и сварных соединений усталостные трещины в некоторых конструкциях из-за их медленного распространения не всегда особо опасны [1, 4]. В то же время они представляют потенциальную опасность, если ресурс (обеспечиваемый статической неопределенностью конструкции и другими факторами) практически исчерпан, либо когда размер трещины будет соответствовать Гриффитсовой критической длине в бесконечной пластине  $L|_{\sigma_{-1}} = L_c$ , определяемой известной зависимостью:

$$L = (K_{1c}/\sigma_{-1})^2/\pi, \quad (1)$$

где  $K_{1c}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации в вершине трещины;  $\sigma_{-1}$  – напряжение предела выносливости материала;  $L$  – половина длины сквозной трещины.

При проектировании конструкций с учетом усталости, в частности, в макро-масштабе материала должно соблюдаться условие  $\sigma_n \leq \sigma_{-1}$ , где  $\sigma_n$  – номинальные или эксплуатационные напряжения. Расчет критической длины трещины по зависимости (1) не составляет особых трудностей, если известен  $K_{1c}$ . Он при плоской деформации может быть рассчитан на базе стандартного набора механических характеристик и среднего диаметра зерна феррито-перлитной стали согласно [5, р. 137], а также – по [6] для плосконапряженного состояния, однако при этом необходимо знать величину  $\sigma_{-1}$ . Предел выносливости при критических размерах трещины несложно определить по (1), если установить взаимосвязь между критической длиной трещины при напряжениях  $\sigma_{-1}$ , механическими характеристиками феррито-перлитной стали и средним диаметром зерна в её структуре.



Необходимость оценки критических размеров трещин является ключевой для построения аналитических моделей и прогнозирования остаточного ресурса сварных конструкций. Цель исследования на данном этапе сводится к определению закономерностей влияния структуры, пластических свойств и механических характеристик материала на длину критической трещины при рабочей нагрузке предела выносливости, и к построению математической модели расчета критической длины трещины в низкоуглеродистых феррито-перлитных сталях.

### 1. Зона предразрушения в трещинах на пределе выносливости

Эксплуатационный ресурс сварных конструкций в значительной степени зависит от происходящих процессов под управлением упругопластических напряжений и деформаций, протекающих в металле. Возможность зарождения и дальнейшего развития трещин в феррито-перлитных сталях определяется их структурой и параметрами, в частности, средним значением диаметра зерна. Однако его вклад в механизм разрушения может изменяться от стадии образования макротрещины до завершающей. Более того, механизм влияния среднего диаметра зерна стали для момента начала перехода трещины в лавинообразное продвижение, вероятно, отличается от механизма, контролирующего продвижение её на стадии образования. Такие предположения основаны на ряде работ [5], [7], [8], [9] и заставляют подробнее рассматривать процессы, контролирующие окончание стадии стабильного развития макротрещины при напряжениях предела выносливости.

Металлические конструкции обычно содержат множество микротрещин, пустот и неоднородностей, которые легко вызывают образование дефектов при действии нагрузок. Для анализа процессов разрушения металла наибольший интерес представляют условия, при которых малые разрывы и образования несплошностей или пор в вершине лидирующей трещины приводят к её развитию. Для того, чтобы происходило такое распространение, должны быть выполнены, по крайней мере, два условия. Во-первых, необходимо, чтобы уменьшение полной энергии (которую составляют упругая энергия тела и потенциальная энергия системы нагружения) соответствовало бы количеству энергии, требуемой для поддержания протекающего процесса расщепления.

Вторым условием является необходимость существования некоторого физического действия, благоприятствующего протеканию этого расщепления. Как показывают исследования [9], [8] и др., для конструктивных и феррито-перлитных сталей, структура претерпевает основную, двухстадийную фрагментацию в зонах, находящихся впереди растущей трещины.

В связи с этим особый интерес представляет момент катастрофического разрушения, которое начинается от сквозной трещины критической длины при внешних напряжениях  $\sigma_{-1}$  ниже предела текучести материала. Автор работы [10], анализируя поведение интеграла (независящего от пути интегрирования и введенного на III международном конгрессе по разрушению), делает заключение о том,

что при реалистичном моделировании пластичности, трещина в вершине и её пластическая зона могут оказаться в безразличном равновесии. При этом любая энергия, высвобождаемая при продвижении трещины, равна энергии, затраченной на образование пластической зоны. Отмеченное обстоятельство соблюдается для квазистатической динамической модели продвижения трещины, а в общем случае – для упругопластических материалов с напряжением течения, стремящимся к постоянной величине при больших деформациях.

Учитывая это, можно предположить, что для макротрещин, теряющих свое стабильное развитие в пластичных материалах под действием напряжений  $\sigma_{-1}$ , средний размер зерна при плоском переходном напряженном состоянии играет не самую главную роль в разрушении. Весомую роль в этом случае может играть высвобождающаяся энергия (упругая и пластическая) за пределами пластической неустойчивости зоны, прилегающей к вершине трещины [11]. Эта зона будет в состоянии пластической нестабильности [9] и, вероятно, связана с критическим раскрытием в вершине трещины и некоторыми характеристиками пластичности.

Авторы работы [12], анализируя различные сплавы, приходят к выводам, что низкое сопротивление движению трещины есть следствие сильной локализации пластического течения в узких зонах. На базе этого положения они приходят к модели распространения трещины в системе образующихся пор длиной  $2h$  на линии движения трещины, расположенных на расстоянии  $s$  друг от друга. В этом случае металл без упрочнения в зоне течения ведет себя так, как если бы он имел предел текучести, определяемый по формуле:

$$\sigma_T(1 - 2h/s), \quad (2)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести. При этом раскрытие в вершине трещины обратно пропорционально (2).

Из формулы (2) следует, что если в мелкозернистом материале величина  $s$  может быть порядка размера зерна, и пластическая область на продолжении трещины при нагрузке  $\sigma_{-1}$  охватывает большое количество зерен, то поры могут заметно повлиять на поведение в вершине трещины по достижении ей размера  $L_c$ .

Если известны параметры поверхности разрушения вязкого излома, при котором, как правило, имеются ямки, чашки или димплы, авторы работы [13, р. 132] рекомендуют зависимость, связывающую  $K_{1c}$ , диаметр димпла  $d$  и  $\sigma_T$ , в следующем виде:

$$K_{1c} = d\sqrt{2E\sigma_T}. \quad (3)$$

Однако, применение (3) для определения критической длины трещины весьма проблематично, так как формула хорошо согласуется только для материалов, у которых димплы образуются на грубых включениях, а их размер сложно определим. Другая зависимость, полученная Крафтом [13], опирается на размер зоны  $d_t$ , численно равный расстоянию между включениями, в которой происходят процессы, приводящие к разрушению. Крафт показал, что разрушение произойдет тогда, когда равномерная деформация  $\epsilon_p$ , численно равная коэффициенту деформационного упрочнения  $n$ , будет достигнута на

расстоянии  $d_t$  впереди вершины трещины, что соответствует выражению:

$$K_{1c} = E \varepsilon_p \sqrt{2\pi d_t}. \quad (4)$$

Из этого следует, что в момент внешних напряжений  $E \varepsilon_p$  для области, примыкающей к вершине трещины, вплоть до  $d_t$ , накапливается некоторое количество упругой и пластической энергии. Ее после выделения в момент подрастания трещины будет вполне достаточно для инициирования следующего подрастания. К моменту окончания стадии стабильного развития макротрещины материал, примыкающий к вершине, испытывает значительное количество циклических нагрузок. В нем накапливается односторонняя пластическая деформация. Поэтому с большой вероятностью можно утверждать, что металл находится в реологическом состоянии ограниченной пластичности, которое может усиливаться жесткостью напряженного состояния. При такой ограниченной пластичности, из-за первичного надрыва в материале у вершины макротрещины, она может получить мгновенное распространение, либо – постепенное (ускоренное) с каждым полциклом при условии, если зона надрыва будет достаточно обширна. Указанный процесс может происходить при напряжениях  $\sigma_{-1}$ , тогда длина трещины должна приблизительно соответствовать критической  $L = L_c$ , а величина выделяемой энергии при движении трещины достаточна для перехода её в ускоренное, нестабильное состояние.

В работах [5] и [13] для определения  $K_{1c}$  предлагаются расчетные формулы, построенные на базе основных структурно-механических характеристик материала и только стандартных механических. Однако для расчета по ним критической длины макротрещины, необходимо знание еще предела выносливости. Получение зависимости, не опирающейся на критический коэффициент интенсивности напряжений и предел выносливости, для непосредственного определения критической длины трещины, позволит при любом одном известном  $K_{1c}$  или  $\sigma_{-1}$  вычислять второе по формуле (1).

Всесторонний анализ вязкости разрушения металла приводит к выводу, что существует определенная качественная взаимосвязь между механическими характеристиками материала и структуры с одной стороны, и длиной критической макротрещины с другой. Так, в работе [14, р. 144] приведена зависимость  $K_{1c}$  для начала катастрофического распространения макротрещины при плоской деформации в функции от радиуса пластической зоны  $r_p$  впереди вершины трещины и истинной критической пластической деформации  $e_{кр}$  в момент разрушения образца. Необходимо отметить, что модель, представленная авторами, очень упрощена, если основываться на выводах в контексте рассмотрения поставленной в работе задачи. Как показывают исследования [15], работа упругой энергии  $K_{1c}^2(1 - \mu^2)/E$  при начале разрушения на 1... 2 порядка может быть меньше общей работы пластической деформации в вершине трещины. С другой стороны для момента, когда размер трещины достигает критического значения, а радиус  $r_p$  – мал в силу жесткости напряженного состояния в вершине трещины и упрочнения

материала циклической нагрузкой в предыстории нагружений, можно считать, что работа упругой энергии при начале катастрофического разрушения близка к значению суммы  $U_{пл} + U_{уп}$ .

Здесь обозначено:  $U_{пл}, U_{уп}$  – работа пластических и упругих сил в пластической области в вершине трещины, соответственно.

Таким образом, и радиус пластической зоны  $r_p$ , и критическая пластическая деформация  $e_{кр}$  являются теми основными характеристиками, которые оказывают преобладающее влияние на  $K_{1c}$  в тот момент, когда трещина достигает  $L_{кр}$ , а нагрузка равна пределу выносливости.

## 2. Построение математической модели

Результаты изучения процесса трещинообразования свидетельствуют о дискретном, скачкообразном развитии трещин [9] при высоких номинальных напряжениях. Подобного рода характер роста наблюдался по результатам моделирования на окончательной стадии разрушения [5] при нагрузке, соответствующей пределу выносливости. Это говорит о том, что при значительной фрагментации структуры в сравнительно больших объемах, примыкающих к вершине трещины, происходит сдерживание пластического деформирования после накопления односторонней пластической деформации. После этого наступает момент ступенчатого продвижения и остановки, но – остановки только в том случае, если выделившейся энергии недостаточно для создания предельных условий, приведших к продвижению трещины.

При высокой плотности дислокаций, создающих фрагментированную структуру, примем условия плоской деформации в вершине трещины. Дополнительные условия будут обеспечиваться за счет стеснения и набранной односторонней пластической деформации под циклическими нагрузками. Запишем соответствующие постулаты для момента, когда  $L = L_{кр}, \sigma = \sigma_{-1}$ :

1. Односторонняя пластическая деформация достигает критической в вершине трещины;
2. Фрагментация (ячеистость) структуры феррито-перлитного материала предельна (находится на втором уровне);
3. Функция разности раскрытия берегов и вершины трещины имеет перегиб в точке близкой к состоянию, когда  $L = L_{кр}, \sigma = \sigma_{-1}$ .

Из экспериментальных данных следует, что циклическое нагружение металлов вызывает значительное изменение структуры и субструктуры и оказывает влияние на все особо чувствительные характеристики. Например, увеличение числа циклов нагружения циклически упрочняющихся (или разупрочняющихся) металлов способствует повышению (или понижению) твердости, прежде всего, на поверхности образцов [9] и др.

Результаты упругопластического анализа пластических зон в вершине трещины [15], определенные на базе модели Панасюка–Дагдейла, существенно отличаются от реальных для материалов с показателем упрочнения  $m > 0,05$ . Тем не менее, будем считать, что при небольших номинальных напряжениях  $\sigma_n = \sigma_{-1}$  раскрытие в вершине трещины  $\delta$  и отношение  $\delta/r_p$  могут быть

определены достаточно точно для случая плоской деформации [16, р. 110] по формулам:

$$\delta = 8\sigma_T \cdot L / \rho_i / E \cdot \ln \sec(\pi\sigma_H / 2 / \sigma_T), \quad (5)$$

$$\delta / r_p = \frac{8e_T \ln \sec(\pi\sigma_H / 2)}{\pi(\sec(\pi\sigma_H / 2) - 1)}, \quad (6)$$

где  $r_p$  – линейный размер пластической зоны на продолжении трещины от её вершины (рис. 3);  $e_T$  – деформация предела текучести.

Для оценки раскрытия берегов этой трещины при номинальных напряжениях ниже предела пропорциональности, допуская некоторую погрешность, имеем следующую зависимость [16, р. 107]:

$$\Delta = \frac{4\sigma_H L}{E}. \quad (7)$$

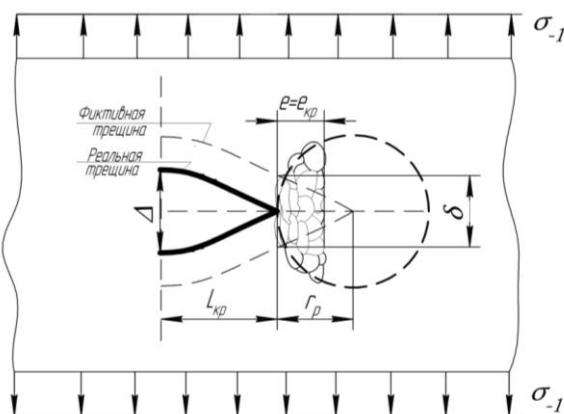


Рис. 3. Состояние металла в вершине критической трещины нормального отрыва под напряжениями предела выносливости (схематизация авторов)

После дифференцирования разницы между  $\delta$  и  $\Delta$  находим, что напряжения, соответствующие моменту ускоренного сближения  $\delta$  и  $\Delta$ , будут соответствовать номинальным, определяемым по выражению:

$$\sigma_H = \sigma_T / 2. \quad (8)$$

При значительных пластических деформациях структура материала претерпевает фрагментацию в вершине трещины, поэтому величина  $e_{кр}$  связана со стадийностью и способностью к деформированию фрагментированной структуры. В терминах А.М. Глезера [17] граница между макропластической и мегапластической деформациями является условной. Она предложена на уровне относительной деформации, равной стопроцентной, или истинной. При этом значение критической истинной деформации равно:

$$e_{кр} \approx 1. \quad (9)$$

В работе [9] отмечается, что самоорганизация структуры с образованием ячеек (рис. 4,б) уже начинается при деформации феррита стали 09Г2С и при среднем значении степени холодной деформации  $\epsilon$  порядка 15...35%. При дальнейшем увеличении деформации происходит утонение стенок ячеек и уменьшение их размера. Фрагменты приобретают вытянутую форму, и возникает ориентация зерен, вытягивающихся в направлении пластического течения (рис. 4,а).

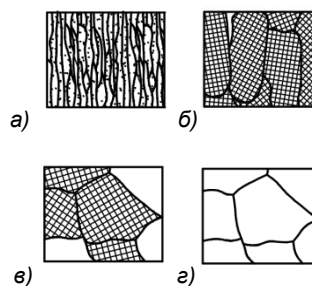


Рис. 4. Микроструктуры при пластической деформации

При критическом раскрытии трещины в некоторой области, примыкающей к её вершине, на модели фиктивной трещины должна образовываться вытянутая структура зерен, находящаяся в предскольном состоянии (рис. 3). Она, вероятно, будет сформирована за счет сдерживания подтока новых дислокаций и перехода их через границы зерен. Материал в данной области должен находиться в состоянии предельной критической пластичности, а его линейная характеристика фрагментов – на втором фрагментарном уровне. Очевидно, что в примыкающей зоне пластичности у трещины также должно существовать некоторое количество зёрен в их предельном пластическом состоянии.

Как было отмечено выше, зона может быть образована за счет накопления части односторонней пластической деформации, охватывающей практически все стадии развития трещины. Однако наиболее существенный вклад в увеличение такой деформации вносится на окончательной стадии разрушения, когда область пластичности велика не только по отношению к длине трещины, но и к линейной характеристике структуры металла. В этой зоне зерна имеют вытянутую форму в виде вытянутой рисинки с поперечным сечением  $d_k$ .

Отнесем средний диаметр зерна недеформированного материала  $d_3$  к  $d_k$ . Тогда для второго фрагментарного уровня имеем:

$$d_3 / d_k \approx 1 / 0,618 / 0,618 = 2,618, \quad (10)$$

где  $d_k$  - диаметр фрагмента. Не трудно заключить, что для этого состояния пластическая деформация может быть определена по зависимости максимального равномерного удлинения [16], и соответствовать значению:

$$e_{кр} = 2 \ln(d_3 / d_k) \approx 2. \quad (11)$$

Для этого же состояния критическая пластическая деформация на испытываемом образце в шейке при разрыве выражается известной зависимостью:

$$e_{кр} = k_n \cdot \ln \frac{1}{1 - \varphi_k}, \quad (12)$$

где  $k_n$  – коэффициент нормирования, введенный нами для перехода от структуры в критическом пластическом состоянии к значению критической пластической деформации образца при разрыве.

Найдем этот коэффициент через относительное (критическое) сужение образца при разрыве, приравняв (12) к (11). Тогда с учетом (9) критическая пластическая деформация определяется по выражению:

$$e_{кр} = 2 = \ln \frac{1}{1 - \varphi_k} + \ln \frac{1}{1 - \varphi_k} = 2 \ln \frac{1}{1 - \varphi_k}. \quad (13)$$

Для критического раскрытия в вершине трещины «структурно-деформационный» критерий можно выразить в следующем виде:

$$\delta_{кр} = d_3 e_{кр} = 2d_3 \ln \frac{1}{1 - \varphi_k} \quad (14)$$

Авторы работы [13, р. 130], ссылаясь на результаты изучения влияния критического поперечного сужения  $\varphi_k$  на коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации  $K_{1c}$  для высокопрочных сталей, отмечают значительный разброс значений  $K_{1c}$  и  $\varphi_k$  и удовлетворительную корреляцию между ними. При этом заключается, что взаимосвязь  $K_{1c}$  и  $\varphi_k$  можно применять только как качественную. С такими выводами можно согласиться, но только в том случае, если отбросить взаимосвязь с некоторыми другими структурными характеристиками, например, средним диаметром зерна стали и т.д.

Для нахождения искомой зависимости выполним подстановку (8) в (5), после чего полученное выражение приравняем к (14) и запишем его относительно  $L$ . В результате выкладок окончательно получим критическую длину макротрещины для номинальных напряжений, равных пределу выносливости, в следующем виде:

$$L_{кр} |_{\sigma_n = \sigma_{-1}} = 0,3607 \frac{\pi \cdot E}{\sigma_T} 2d_3 \ln \frac{1}{1 - \varphi_k} \quad (15)$$

### 3. Анализ результатов

В судовых крупногабаритных конструкциях с металлургическими и конструктивными концентраторами напряжений при эксплуатации, как правило, не удается предотвратить образование трещин. Однако их появление не всегда приводит к катастрофическому разрушению вследствие большой статической неопределенности таких сложных конструкций и перераспределения в них напряжений. В вершине критической развивающейся макротрещины при напряжениях, соответствующих пределу выносливости, накапливается односторонняя пластическая деформация, которая снижает пластичность сильно фрагментированной зоны. В подобных условиях трещина может продвигаться рывками, переходя от стабильного состояния в нестабильное. Затем она может останавливаться в развитии. При этом количество циклов остаточного ресурса остается не только незначительным, но и сильно зависящим от таких характеристик как предел текучести, наличие дефектов, текущий диаметр зерна стали конструкции, в которой продвигается трещина.

Проверим адекватность предложенной аналитической модели (15) на примере группы феррито-перлитных сталей (табл. 1). Для сопоставления результатов, полученных по (15) находим критические длины трещин по экспериментальным данным с учетом классической формулы (1). Пределы выносливости рассчитываем при условии плоской деформации по методу [5], который учитывает вклад среднего диаметра зерна, коэффициент упрочнения  $m$  и другие механические характеристики, оказывающие существенное влияние на предел выносливости.

Таблица 1.

Основные экспериментальные и полученные расчетом характеристики сталей

Марка стали	$\sigma_T$ , МПа	$m$	$\varphi_k$	$d_3$ , мкм	$K_{1c}$ , МПа	$\sigma_{-1}^{**}$ , МПа
Сталь 10	190	0,17	0,73	66	103,6	135,4
Ст3сп	270	0,16	0,71	37	101	192
22К	310	0,16	0,69	30	97	220
Сталь 50	350	0,16	0,62	25	78	247
37ХН3А	743	0,12	0,6	14*	73	480

Примечание: \*-вычислено по данным сопротивления микроскола недеформированного материала; \*\*-значение полученное расчетом

На рис. 5,а представлены значения критических длин сквозных трещин на пределе выносливости для сталей с разными пределами текучести. Результаты сопоставления расчета по (15) с экспериментальными данными, несмотря на принятые многочисленные допущения, как видно, показывают достаточно хорошее согласование для феррито-перлитных сталей разной прочности (см. рис. 5,б).

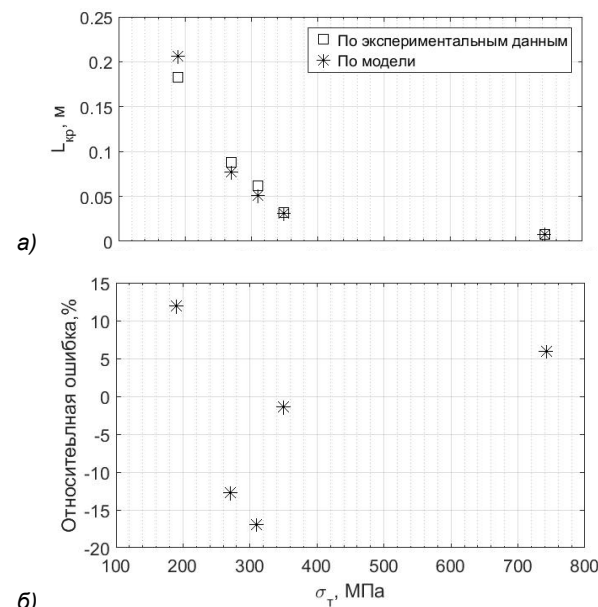


Рис. 5. Значения критических длин трещин сталей в зависимости от их предела текучести (а) и относительная погрешность модели (б)

При приближении размера трещины к  $L_{кр}$  начинается скачкообразное её подрастание, поэтому точное определение количества циклов, соответствующее моменту, когда скачкообразное подрастание заканчивается, и она распространится со скоростью звука, не может быть точно выражено детерминистической моделью. Средний диаметр зерна материала может значительно различаться в зонах сварных конструкций, например, в ЗТВ и материале, неподверженном воздействию сварки. Поэтому, если учесть, что стадия развития макротрещины для элементов крупногабаритных деталей без концентраторов напряжений занимает по времени почти 20% на воздухе, то относительную погрешность определения  $L_{кр}$  в пределах ~15% может считаться положительным результатом. В рамках этой погрешности попадает период так называемого «циклического долома» [9], где для низких циклических усталостных напряжений



примерно 1/10 часть остаточного ресурса соответствует возрастанию длины трещины примерно в 2 раза.

Таким образом, предложенные на основе критериев структурно-деформационного анализа и полученные аналитические зависимости могут быть использованы в расчетах усталостной прочности судовых и других крупногабаритных конструкций.

### Заключение

Для конструкций корпуса морских судов с металлургическими и конструктивными концентраторами напряжений важным является оценка остаточного ресурса и, соответственно, определение критических размеров возникающих трещин усталости. В работе установлено, что при напряжениях, соответствующих пределу выносливости стали, скорости раскрытия в вершине критической трещины в момент ее распространения и её берегов сближаются. Этот момент энергетически соответствует переходу трещины в

нестабильное состояние. Накопление односторонних пластических деформаций приводит к предельному состоянию пластичности области, примыкающей к вершине трещины и лавинообразному или резко ускоренному её движению. Эта критическая область имеет взаимосвязь с диаметром зерна материала, характеристикой критической пластичности и критическим раскрытием в вершине трещины на пределе выносливости.

Полученные аналитические зависимости позволяют по данным среднего диаметра зерна феррито-перлитной стали и критического сужения рассчитывать критические размеры макротрещины, при нагрузках предела выносливости, без использования известной Гриффитсовой взаимосвязи между длиной трещины, напряжениями и коэффициентом интенсивности напряжений.

Представленная математическая модель и подход на основе критериев структурно-деформационного анализа могут быть использованы в инженерных расчетах для судовых конструкций и оценки остаточного ресурса.

### Литература

1. Повреждения и расчетный анализ прочности корабельных конструкций: Монография/ В.В. Новиков, Г.П. Турмов, О.Э Суров, А.П. Герман, К.А. Молоков, М.В. Китаев. Владивосток: ДВФУ, 2020. 266 с.
2. Сазанов В.П. Критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости и закономерности ее образования / Н.А.Сургутанов, А.В.Письмаров, А.С.Кошелев //Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Самара: Самарский университет, 2018. С. 218–220.
3. Molokov K., Domashevskaja Y. Estimation of endurance limits of welded joints by the criterion of non-propagating cracks //International conference on industrial engineering, icie 2017. Elsevier Ltd. Procedia engineering, 2017. PP.479–486.
4. Казанов Г.Т., Новиков В.В., Турмов Г.П. Концентрация напряжений и другие особенности напряженного состояния судовых корпусных конструкций. - Владивосток: ДВФУ, 2014. - 178 с.
5. Матюхин Г.В., Горбачев К.П. Основы расчетных методов линейной механики разрушения: монография. Владивосток: ДВГТУ, 2008. 304 с.
6. Молоков К.А. Оценка выносливости сварных соединений с учетом общего пластического деформирования материала при плоском напряженном состоянии. // Вестник Инженерной школы Дальневост. федерал. ун-та. 2019. № 1(38). С.19-26.
7. Файвисович А.В., Береза И.Г. Кинетика геометрии макротрещины //Эксплуатация морского транспорта. 2019. - №1 (90). С.76-82.
8. Федотов С.Н. Квазихрупкое разрушение как разрушение иерархической структуры // Физ. мезомех. - 2015. - Т. 18. -№ 6. - С.24-31.
9. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. - М.: Наука, 2015. - 479 с.
10. Билби Б. Разрушение // Механика разрушения. Разрушение конструкций. М.: Мир, 1980. - С. 203-228.
11. Внук М.П. Структурная целостность стыковых соединений // Физ. мезомеханика 2010. - Т.13. - №5. С. 53-66.
12. Смит Е., Кук Т., Рау К. Локализация пластического течения и трещиностойкость высокопрочных материалов // Механика разрушения. Разрушение конструкций. М.: Мир, 1980. - С. 121-147.
13. Смирнов А.Н., Муравьев В.В., Абабков Н.В. Разрушение и диагностика металлов: Монография. - Москва, Кемерово: Инновационное машиностроение, 2016. - 479 с.
14. Кудряшов В.Г., Смоленцев В.И. Вязкость разрушения алюминиевых сплавов. - М.: Металлургия, 1976. 296 с.
15. Черепанов Г.П. Механика разрушения. Регулярная и хаотическая динамика. М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. 872 с.
16. Куркин С.А. Прочность сварных тонкостенных сосудов, работающих под давлением. - М.: Машиностроение, 1976. - 184 с.
17. Основы пластической деформации наноструктурных материалов. / Под ред. А.М. Глезера. - М.: Физматлит, 2016. - 304 с.

### References

1. Povrezhdenija i raschetnyj analiz prochnosti korabel'nyh konstrukcij [Damage and design analysis of the strength of ship structures]: Monografija V.V. Novikov, G.P. Turmov, O.Je Surov, A.P. German, K.A. Molokov, M.V. Kitaev. Vladivostok: DVFU, 2020. 266 s.
2. Sazanov V.P. Kriticheskaja glubina nerastrostranjajushhejsja treshhiny ustalosti i zakonomernosti ee obrazovanija [The critical depth of a non-propagating fatigue crack and the laws of its formation]. N.A. Surgutanov,

- A.V. Pis'marov, A.S. Koshelev. Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya. Samara: Samarskij universitet, 2018. S. 218–220.
3. Molokov K., Domashevskaja Y. Estimation of endurance limits of welded joints by the criterion of non-propagating cracks International conference on industrial engineering, icie 2017. Elsevier Ltd. Procedia engineering, 2017. PP.479–486.
  4. Kazanov G.T., Novikov V.V., Turmov G.P. Koncentracija naprjazhenij i drugie osobennosti naprjazhennogo sostojanija sudovyh korpusnyh konstrukcij [Stress concentration and other stress characteristics of ship hull structures]. Vladivostok: DVFU, 2014. 178 s.
  5. Matorin G.V., Gorbachev K.P. Osnovy raschetnyh metodov linejnoj mehaniki razrusheniya [Fundamentals of calculation methods of linear fracture mechanics]: monografija. Vladivostok: DVGTU, 2008. 304 s.
  6. Molokov K.A. Ocenka vynosivosti svarnyh soedinenij s uchetom obshhego plasticheskogo deformirovanija materiala pri ploskom naprjazhennom sostojanii [Endurance assessment of welded joints, taking into account the general plastic deformation of the material under plane stress]. Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevost. federal. un-ta. 2019. N 1(38). S.19–26.
  7. Fajvisovich A.V., Bereza I.G. Kinetika geometrii makrotreshhiny [Macrocrack geometry kinetics]. Jekspluatacija morskogo transporta. 2019. N1 (90). S.76–82.
  8. Fedotov S.N. Kvazihrupkoe razrushenie kak razrushenie ierarhicheskoj struktury [Quasi-fragile destruction as a destruction of hierarchical structure]. Fiz. mezomeh. 2015. T. 18. N 6. S.24–31.
  9. Terent'ev V.F., Korableva S.A. Ustalost' metallov [Metal fatigue]. M.: Nauka, 2015. 479 s.
  10. Bilbi B. Razrushenie [Destruction]. Mehanika razrusheniya. Razrushenie konstrukcij. M.: Mir, 1980. S. 203-228.
  11. Vnuk M.P. Strukturnaja celostnost' stykovyh soedineniej [Structural integrity of butt joints]. Fiz. mezomehanika 2010. T.13. N5. S. 53–66.
  12. Smit E., Kuk T., Rau K. Lokalizacija plasticheskogo techenija i treshhinostojkost' vysokoprochnyh materialov [Localization of plastic flow and crack resistance of high-strength materials]. Mehanika razrusheniya. Razrushenie konstrukcij. M.: Mir, 1980. S. 121-147.
  13. Smirnov A.N., Murav'ev V.V., Ababkov N.V. Razrushenie i diagnostika metallov [Destruction and diagnostics of metals]: Monografija. Moskva, Kemerovo: Innovacionnoe mashinostroenie, 2016. 479 s.
  14. Kudrjashov V.G., Smolencev V.I. Vjazkost' razrusheniya aljuminievyh splavov [The fracture toughness of aluminum alloys]. M.: Metallurgija, 1976. 296 s.
  15. Cherepanov G.P. Mehanika razrusheniya. Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika [Regular and chaotic dynamics]. M., Izhevsk: Institut komp'juternyh issledovanij, 2012. 872 s.
  16. Kurkin S.A. Prochnost' svarnyh tonkostennyh sosudov, rabotajushih pod davleniem [Strength of welded thin-walled pressure vessels]. M.: Mashinostroenie, 1976. 184 s.
  17. Osnovy plasticheskogo deformacii nanostrukturnyh materialov [Fundamentals of plastic deformation of nanostructured materials]. Pod red. A.M. Glezera. M.: Fizmatlit, 2016. 304 s.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

**Konstantin A. Molokov**, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Welding Engineering, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanov, 8, e-mail: spektrum011277@gmail.com

**Андрей Игоревич Мамонтов**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет, 690950, Владивосток, ул. Суханова, 8, e-mail: Andrew.Mamontov@outlook.com

**Andrey I. Mamontov**, Ph.D. (Eng), assistant professor of Shipbuilding and ocean engineering department, Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, st. Sukhanova, 8, e-mail: Andrew.Mamontov@outlook.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

**Valery V. Novikov**, Ph.D. (Eng), assistant professor of the Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, Far Eastern Federal University 690950, Vladivostok, ul. Sukhanov, 8, e-mail: leka1551@rambler.ru

**Андрей Петрович Герман**, доцент кафедры кораблестроения и океанотехники, Дальневосточный федеральный университет, 690950, Владивосток, ул. Суханова, 8, e-mail: gerand1@yandex.ru

**Andrey P. German**, assistant professor of the Department of Shipbuilding and Ocean Engineering, Far Eastern Federal University 690950, Vladivostok, ul. Sukhanov, 8, E-mail: gerand1@yandex.ru

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629.5.062.13

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.003

## Исследование аварийных ситуаций, вызванных отказом в каналах системы управления движением экраноплана

В.Ю. Каминский<sup>1</sup>, Д.А. Скороходов<sup>1,2</sup>, А.Л. Стариченков<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской Академии наук, <sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

**Аннотация.** Рассмотрены способы повышения надёжности каналов системы управления движением экраноплана, измерителей параметров движения и угловых скоростей, а также особенности их реализации. Исследована система обнаружения и индикации отказов каналов управления, исполнительных механизмов и приборов - указателей. Проанализирован принцип генерации информации о достижении предельных значений координат движения. Рассмотрены особенности электропитания системы управления движением и автономных подсистем гидравлики. Исследованы последствия отказа источников информации и каналов системы управления движением экраноплана в диапазоне относительных высот  $\bar{h} = 0,15 \div 0,3$  в условиях волнения моря различной интенсивности. Выполнен анализ отказов в цепях формирования интегральной составляющей алгоритма управления для каналов тангажа, крена, высоты и путевого курса. Исследовано поведение экраноплана при отказах исполнительных приводов секций элеронов-закрылков, рулей высоты, а также при отказах приводов секций руля направления.

**Ключевые слова:** безопасность, система управления движением, отказ, резервирование, исполнительный механизм, аварийная ситуация.

## The study of emergency situations caused by a failure in the channels of the motion control system of the ekranoplan

Valery Yu. Kaminsky<sup>1</sup>, Dmitriy A. Skorokhodov<sup>1,2</sup>, Alexey L. Starichenkov<sup>2</sup><sup>1</sup>Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of Science, Russian Federation, <sup>2</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University LETI

**Abstract.** The ways of increasing the reliability of channels of the ekranoplan motion control system, motion parameters and angular velocity meters, as well as the features of their implementation are considered. The system of detection and indication of failures of control channels, actuators and indicator devices is studied. The principle of generating information about reaching the limit values of the movement coordinates is analyzed. The paper considers the features of power supply for the motion control system and Autonomous hydraulic subsystems. The consequences of failure of information sources and channels of the ekranoplan movement control system in the range of relative heights  $\bar{h} = 0.15 \div 0.3$  in the conditions of sea waves of different intensity are studied. The analysis of failures in the chains of forming an integral component of the control algorithm for pitch, roll, height and track rate channels is performed. The behavior of the ekranoplan is studied when the Executive drives of the Aileron-flaps sections, the elevators, as well as when the drives of the rudder sections fail.

**Keywords:** safety, motion control system, failure, redundancy, actuator, emergency.

## Введение

Безопасность полёта экраноплана, оснащённого системой управления движением (СУД), обеспечивается трехкратным резервированием отдельных механизмов и устройств [1-3]. Резервируются измерители: крена -  $\gamma$ , тангажа -  $\psi$ , высоты -  $H$ , вертикальной скорости -  $\dot{H}$ . Устанавливаются резервные приборы-указатели (УК), измерители угловых скоростей (ИУС) соответственно: по продольной -  $\omega_x$ , поперечной -  $\omega_y$ , и вертикальной осям -  $\omega_z$ . Резервируются каналы демпфирования и стабилизации по крену, тангажу, высоте и курсу -  $\varphi$ .

Рулевые агрегаты (РА) построены по схеме с тремя каналами. Отказ в любом из элементов одного из каналов демпфирования или стабилизации приводит к возникновению возмущения в канале РА. При рассогласовании сигналов на величину  $\sim 25\%$  от

половины хода штока РА, прибор контроля РА выявляет отказавший канал и «кольцует» его по гидравлике. При этом канал сохраняет работоспособность. В случае отказа во втором канале (вторичный отказ) РА «кольцуется» по всем каналам. Возникает отклонение рулевых секций на 25% по в ту или другую сторону, секции руля возвращаются в нейтральное положение за время 5 – 7с.

Нерезервированными остаются: измерители гироскопического курса и угла сноса, не входящие в состав СУД. Не резервируются стабилизированная по углам крена и тангажа платформа, на которой установлены акселерометры, измеряющие вертикальное ускорение экраноплана, исполнительные механизмы (ИМ), компенсирующие статические ошибки стабилизации и управления аппаратом, гидравлические бустерные устройства (БУ), осуществляющие перекладку рулевых секций и не входящие в состав СУД.

Для обеспечения безопасности движения экраноплана предусмотрена система обнаружения и индикации отказов подканалов и каналов

управления, исполнительных механизмов и приборов указателей. При этом вырабатывается информация о достижении предельно-допустимых значений координат движения [4-6]. Предусмотрены устройства локализации отказов, осуществляющие автоматическое отключение отказавших подканалов. На случай отказов каналов управления (вторичные отказы) предусмотрено ограничение диапазона переключки РА в режиме демпфирования и стабилизации.

Совместно с СУД работают системы электропитания и гидравлики. Система электропитания - трёхфазная. Причем каждый подканал РА подключён к одной из трех фаз и, следовательно, исчезновение питания одной из фаз приводит к отказу одного подканала РА. Система гидравлики состоит из трех автономных подсистем. Каждый подканал РА подключён к одной из этих подсистем. Поэтому отказ одной из подсистем гидравлики приводит к отказу одного из трех подканалов РА [7-8].

Бустерные устройства являются двухкамерными, причем каждая камера может обеспечивать независимую переключку рулевых секций, при этом отказ одной из подсистем гидравлики не приводит к отказу рулей. Таким образом, отказ в системах электропитания и гидравлики не приводит к потере работоспособности СУД экраноплана. Исходя из особенностей построения СУД, следует рассмотреть различные аварийные ситуации и оценить возможности СУД при обеспечении безопасности движения на экране [9-11].

### 1. Отказы информационных каналов системы управления движением

Для формирования путевого курса ( $\varphi_{\Pi}$ ) используется следующая зависимость:

$$\varphi_{\Pi} = \varphi - \beta_{\Pi},$$

где:  $\varphi_{\Pi}$  - путевой курс,

$\varphi$  - угол рыскания от системы курсоуказания,

$\beta_{\Pi}$  - угол скольжения от доплеровского измерителя скорости и сноса.

Исследовались процессы в системе управления, которые генерируют скачкообразное изменение сигналов  $\varphi$  и  $\beta_{\Pi}$  от текущих значений до нуля и максимальных значений ( $\pm 90^\circ$  и  $\pm 20^\circ$ ). Отказы в навигационной системе при движении экраноплана в диапазоне относительных высот  $\bar{h} = 0,15 \div 0,3$ , (где  $\bar{h} = \frac{H}{b}$ ,  $b$  - аэродинамическая хорда крыла в м,  $H$  - высота движения экраноплана над подстилающей поверхностью в м) приводят к развороту экраноплана по курсу с угловой скоростью  $\omega_y \leq 0,3^\circ/\text{с}$ , установившемуся крену  $\gamma_{уст} \leq 0,2 \div 0,55^\circ$  и установившемуся скольжению  $\beta_{уст} \leq 2,6^\circ$ . Также отказы вызывают рост динамических ошибок стабилизации экраноплана по параметрам бокового

движения. Причем при движении в условиях трёхбалльного волнения рост среднеквадратических ошибок стабилизации не превышает  $10 \div 15\%$  по курсу и  $0 \div 15\%$  по крену.

Разворот и крен экраноплана, связанные с возмущениями при отказах источников информации, быстро и эффективно обрабатывается пилотами путём перевода работы СУД из режима стабилизации в режим управления (с демпфированием).

Назначение высоты  $-H$  и вертикальной скорости  $-\dot{H}$  аппарата осуществляется с помощью комбинированного измерителя, использующего сигналы акселерометра и высотомера. При выходе из строя следящих систем стабилизированной по тангажу и крену платформы в сигналах измерителя возникают ошибки, вызванные неточностью компенсации проекции ускорения силы тяжести  $-g$  в сигнале акселерометра. Исследования показали, что увеличение относительных высот для обеспечения безопасного движения экраноплана с недопущением задевания боковыми шайбами крыла поверхности экрана невелико и лежит в пределах  $\Delta \bar{h} \leq 0,135 - 0,195$ .

### 2. Отказы каналов управления

Выработка балансировочного угла отклонения рулевых секций осуществляется исполнительным механизмом (ИМ), работающим в режиме интегрирующего привода. В случае неисправности ИМ осуществляется автоматический перевод канала из режима стабилизации в режим демпфирования. Балансировочное значение отклонения рулевого органа с отказавшим каналом управления фиксируется в положении, предшествующем отказу.

Моделирование поведения экраноплана при отказе ИМ в одном из каналов управления показывает, что характер переходных процессов определяется динамическими характеристиками управляемого объекта при работе СУД в режиме демпфирования. Максимальные отклонения параметров движения экраноплана при отказе ИМ могут вырасти до значений, имеющих место при управлении в режиме демпфирования.

К наиболее тяжелым последствиям приводят отказы бустерных устройств (БУ), связанные с забросом отдельных рулевых секций на механические ограничители и с их «замораживанием» в этих крайних положениях.

Проанализируем аварийные ситуации, связанные с отключением отдельных каналов управления и отказом исполнительных приводов бустерных устройств секций рулей и элеронов-закрылков (флаперонов).

Неисправность какого-либо элемента в одном из трех подканалов системы управления, приводящая к рассогласованию на величину, превышающую четверть расхода рабочей среды рулевого агрегата, приводит к отказу данного подканала, при этом канал управления в целом сохраняет работоспособность. При следующей неисправности в этом же канале происходит отказ всего канала управления, который сопровождается:



- «кольцеванием» рулевых агрегатов (РА) по всем подканалам с утратой демпфирующих свойств и свойств стабилизации этого канала;
  - отклонением РА от текущего положения на величину  $\pm 0,25\%$  от установившегося значения;
  - фиксированием в момент отказа положения исполнительного механизма;
  - плавным возвращением РА в нейтральное положение за время 5÷7 с.
- Следствием отказа канала управления являются:
- возникновение переходного процесса, обусловленного отклонением РА;

- ухудшение динамических характеристик экраноплана, вследствие утраты демпфирующих свойств и функций стабилизации, приводящих к снижению динамической точности стабилизации параметров по данному каналу управления и увеличению опасности контакта корпуса с поверхностью экрана.

Отклонения по высоте и крену в течение 5с переходного процесса, вызванного отклонением РА, снижают запас высоты под концевыми шайбами на величины, не превышающие значений, приведённых в табл. 1.

Таблица 1

Отклонения судна в переходном процессе при отказе рулевых агрегатов

Отказ канала	Режим				
	$\bar{h} = 0,15$	$\bar{h} = 0,2$	$\bar{h} = 0,3$	$\bar{h} = 0,5$	$\bar{h} = 1,0$
Руль высоты, м	-0,2	-0,27	-0,4	-0,5	-0,59
Закрылки, м	-0,3	-0,45	-0,8	-1,4	-2,5
Элероны, м	-0,2	-0,53	-0,93	-2,85	-3,0
Руль направления, м	-0,04	-0,09	-0,14	-0,19	-0,2

Переходные процессы увеличивают амплитуду и частоту колебаний экраноплана, особенно в боковом направлении на больших высотах. По окончании переходных процессов, вызванных отказом каналов управления, судно выходит на режим, близкий к исходному, балансировочному режиму движения. Динамическая точность стабилизации высоты и крена при отказе каналов управления снижается.

Наибольшие ошибки стабилизации аппарата по высоте и крену (рост в 2-4 раза) фиксируются при отказе канала управления закрылками и элеронами.

Полагая, что безопасность движения экраноплана определяется, прежде всего, возможностью задевания экранной поверхности элементами корпуса, определим условие безопасности полета, как отсутствие касания шайбами крыла экрана поверхности:

$$H_{кш} = H_{кш.бал} - \Delta H_{кш.пред}^{отк} - \Delta H_{кш}(W) - 0,5H_{\epsilon}$$

где:  $\Delta H_{кш.пред}^{отк}$  - предельное снижение запаса высоты под шайбами крыла в переходном процессе, вызванное отказом канала управления при отсутствии иных возмущений;

$\Delta H_{кш}(W)$  - предельное снижение запаса высоты при статических ветровых воздействиях в случае отсутствия управления по соответствующему каналу;

$0,5H_{\epsilon}$  - половина высоты волны для заданного морского волнения, обычно 3% обеспеченности.

Проведена оценка величины  $\Delta H_{кш}(W)$  при отказах каналов управления в условиях мощных порывов ветра - бокового (3,75 м/с) и продольного (7,5 м/с) - с продолжительностью действия 5с.

На основании выполненных исследований определим относительную высоту движения  $\bar{h}_{кас}$ , пограничную, по условиям касания шайбами крыла поверхности экрана.

При относительной балансировочной высоте движения  $\bar{h}_{бал} \leq \bar{h}_{кас}$  наблюдается касание шайбами поверхности экрана. Таким образом, при отказах каналов управления в условиях полета при

волнении 3÷5 баллов задевание вершук волн реализуется при условии:

$$\bar{h}_{бал} \leq \bar{h}_{кас},$$

где:  $\bar{h}_{кас} = 0,14 \div 0,27$  - при нормальной работе СУД,

$\bar{h}_{кас} = 0,14 \div 0,27$  - при отказе канала управления РН,

$\bar{h}_{кас} = 0,17 \div 0,28$  - при отказе канала управления рулём высоты,

$\bar{h}_{кас} = 0,2 \div 0,7$  - при отказе канала управления закрылками,

$\bar{h}_{кас} = 0,21 \div 0,53$  - при отказе канала управления элеронами.

Следовательно, относительные высоты движения должны выбираться исходя из условия:

$$\bar{h}_{бал} > \bar{h}_{кас}.$$

Наибольшие отклонения высот движения имеют место при отказах каналов управления элеронами и закрылками. При возникновении первых отказов рекомендуется перевод этих каналов в режим демпфирования или простого ручного управления.

### 3. Отказы исполнительных приводов бустерных устройств секций флаперонов и руля направления

На каждой половине несущего крыла экраноплана расположено по шесть секций элеронов-закрылков, каждая из которых имеет автономный исполнительный привод. Площади секций ЭЗ приняты равными. При отказе ИП секции уходят со скоростью  $|\dot{\delta}_{\text{ЭЗ}}|_{\text{max}} = 13,5 \frac{0}{\text{с}}$  в крайние положения  $-10^\circ$  или  $+35^\circ$  и фиксируются. Максимальные отклонения секций ЭЗ при работе СУД приняты равными:  $-10^\circ \leq \delta_3 \leq +15^\circ$  - при работе секции в режиме закрылков и  $|\delta_3| \leq +6,7^\circ$  - при работе в режиме элеронов.

Отклонение секций вниз принято положительным, вверх - отрицательным. Отклонения по высоте и крену в переходном процессе снижают запас высоты под концевыми шайбами крыла на величины, не превышающие предельных значений, которые

устанавливаются после отказа в течение 4-10 с (табл. 2).

Таблица 2

Отклонения судна в переходном процессе

Отказ	Режим				
	$\bar{h} = 0,15$	$\bar{h} = 0,2$	$\bar{h} = 0,3$	$\bar{h} = 0,5$	$\bar{h} = 1,0$
$\dot{\delta}_{\text{ЭЗ}} = -13^\circ/\text{с}$	-0,23	-0,38	-0,58	-0,86	-0,93
$\dot{\delta}_{\text{ЭЗ}} = +13^\circ/\text{с}$	-0,22	-0,45	-0,63	-2,3	-2,3

Динамическая точность стабилизации высоты и крена при отказе крайней секции ЭЗ в режимах  $\bar{h}_{\text{бал}} = 0,143 \div 0,2 \div 0,333 \div 1,5$  оценивается среднеквадратическими величинами:

- $\sigma_{\Delta H} = 0,091 \div 0,125 \div 0,195 \div 0,59$  (м);
- $\sigma_{\Delta \gamma} = 0,031^\circ \div 0,086^\circ \div 0,162^\circ \div 0,353^\circ$ .

Оценка приведена для условий волнения моря в три балла, что превышает аналогичные значения при нормальной работе рулевых органов ~ на 10%.

Относительная высота касания шайбами поверхности экрана при волнении 3÷5 баллов составляет:

- $\bar{h}_{\text{кас}} = 0,18 \div 0,33$  при нормальной работе рулевых органов;
- $\bar{h}_{\text{кас}} = 0,18 \div 0,35$  при отказе секции ЭЗ.

Следовательно, отказ секций элеронов-закрылков приводит к незначительному увеличению безопасных высот движения. При этом возникает курсовой разворот экраноплана.

Для восстановления прямолинейного полета рекомендуется переход на ручное управление с помощью руля направления и последующее включение СУД в режим стабилизации.

#### 4. Отказы приводов секций руля высоты

Руль высоты имеет восемь одинаковых секций (по четыре секции с каждого борта). При отказе секция уходит с предельной скоростью в крайнее положение  $\delta_{\text{в.макс}} = \pm 30^\circ$  и фиксируется в нём.

Четыре внутренние секции РВ работают от СУД в диапазоне отклонений  $|\delta_{\text{в}}| \leq 8^\circ$ , четыре внешние секции работают от системы ручного управления. Наиболее тяжелым случаем является отказ одной из крайних секций. Результаты моделирования отказа ухода секции РВ со скоростью  $\dot{\delta}_{\text{в.макс}} = \pm 10^\circ/\text{с}$  показывают, что возникающий продольный момент вызывает существенное отклонение судна по углу тангажа ( $+3,5^\circ \div -4,5^\circ$ ) и по высоте, что приводит в первые 5 ÷ 10с процесса либо к касанию экрана, либо к выходу за пределы действия экрана ( $\bar{h} > 1,0$ ), при исходной высоте  $\bar{h}_{\text{бал}} \geq 0,4$ .

Динамическая точность стабилизации высоты при отказе секции меняется незначительно. Поэтому опасность отказа секции РВ обусловлена возмущениями, вносимыми отказом, в течение первых 5÷10 с. Отклонения параметров бокового движения при отказе секции РВ незначительны и полностью компенсируются перекладкой руля направления и элеронов. Зафиксировать высоту полета после отказа можно за счет корректировки скорости через управление тягой.

Таким образом, отказ одной секции РВ приводит к реализации следующего сценария. В первые

5÷10с, вследствие возмущений, вызванных отказом, падает высота полёта с возможностью контакта корпуса судна с экраном. В этом случае обеспечение безопасного режима движения экраноплана достигается путем корректировки балансировочного положения РВ в режиме ручного управления.

#### 5. Отказы приводов секций руля направления

Руль направления (РН) имеет две одинаковых секции. При отказах, секции уходят с максимальной скоростью  $|\dot{\delta}_{\text{н.отж.макс}}| \cong 16\%$  в крайние положения

$\delta_{\text{н.макс}} = \pm 30^\circ$  и фиксируются. При реализации крейсерского режима полета, отказ секции РН приводит к незначительному отклонению судна по высоте и крену в первые 10с после отказа. Динамическая точность стабилизации угла крена в полете с отказавшей секцией РН снижается мало (в пределах 10%). Диапазон опасных высот полета (задевание вершушек волн) составляет:  $\bar{h}_{\text{кас}} \leq 0,18 \div 0,33$ , т.е. сравним с безотказным движением, при котором  $\bar{h}_{\text{кас}} \leq 0,14 \div 0,27$ .

Установившиеся режимы движения с отказавшей секцией РН соответствуют полету в режиме разворота с подскоком по высоте и соответствующим приращением скорости движения.

Общим для рассматриваемых режимов движения является то, что установившийся полет осуществляется при углах:  $|\gamma| \leq 8^\circ$ ,  $|\beta| \leq 5,3^\circ$ ,  $|\Delta\varphi_{\text{н}}| \neq 0$  и с отклонением рулевых органов  $|\delta_{\text{г}}| \leq 1,2^\circ$  и  $|\delta_{\text{г}}| \leq 4-13^\circ$ . Причём в этих режимах наблюдаются небольшие периодические ( $T \cong 15\text{с}$ ) всплески ошибки  $\Delta\varphi$  в пределах  $0,1^\circ$ .

Итак, отказ привода секции РН приводит к незначительным изменениям динамических характеристик судна с СУД (~ на 10%). Снижение запаса высоты под концевыми шайбами, в первые 10с, не превышает  $|\Delta H_{\text{кш}}| < 0,3 \div 1,25\text{м}$  в зависимости от балансировочной высоты движения.

Параметры установившегося режима движения экраноплана после отказа секции РН характеризуются работой СУД в режиме разворота. При этом параметры движения составляют:

$$\begin{aligned} |\beta_{\text{уст}}| &= 3,5^\circ \div 4,8^\circ, & |\gamma_{\text{уст}}| &= 5,3^\circ \div 6^\circ, \\ |\dot{\varphi}_{\text{уст}}| &= 0 \div 0,1^\circ/\text{с}, & \varphi_{\text{н.уст}} &= 13,5^\circ \div 13,7^\circ, \\ \delta_{\text{н.уст}} &= 7 \div 13,5^\circ, & \delta_{\text{в.уст}} &= 0,85^\circ \div 1,1^\circ. \end{aligned}$$

Для восстановления прямолинейного движения после отказа секции РН предлагается переход на ручное управление РН в совокупности со специальным заданием бортовой несимметрии по тяге главных двигателей с целью исключения режима работы исправной секции РН с ограничением.

### Заключение

1. Отказы в навигационной системе при движении экраноплана в диапазоне относительных высот  $\bar{h} = 0,15 \div 0,3$  приводят к его развороту по курсу со следующими характеристиками: угловая скорость разворота по курсу -  $\omega_y \leq 0,3^\circ/\text{с}$ ; установившийся крен -  $\gamma_{уст} \leq 0,2 \div 0,55^\circ$ ; установившееся скольжение -  $\beta_{уст} \leq 2,6^\circ$ . Также отказы увеличивают динамические ошибки стабилизации экраноплана по параметрам бокового движения. Причем, при движении в условиях трёхбалльного волнения, рост среднеквадратической ошибки стабилизации не превышает следующих значений: по курсу -  $10 \div 15\%$ ; по крену -  $0 \div 15\%$ . Разворот и крен экраноплана будут отработаны пилотами, имеющими более существенные управляющие ресурсы по сравнению с СУД в режиме стабилизации. Также пилоты имеют возможность быстро перевести работу СУД из режима стабилизации в режим управления (с демпфированием) и эффективно локализовать ситуацию.

2. При отказе ИМ в одном из каналов управления характер переходных процессов определяется динамическими характеристиками управляемого движения экраноплана при работе СУД в режиме демпфирования. Максимальное отклонение параметров движения экраноплана может достигать значений, характерных для управления в режиме демпфирования.

3. Особого внимания требуют наиболее частые отказы каналов управления. Первый отказ в одном из каналов управления, не инициирует мероприятия по его устранению. Экраноплан продолжает движение в основном (экранном) режиме вплоть до возникновения второго отказа, вызывающего отключение канала управления.

4. К наиболее тяжелым последствиям приводят отказ бустерных устройств, приводящий к забросу рулевых секций на механические ограничители и их фиксацией в крайнем положении.

5. При отказе канала управления снижается динамическая точность стабилизации параметров по данному каналу и возрастает опасность контакта корпуса экраноплана с поверхностью экрана вследствие утраты демпфирующих свойств.

6. Максимальное отклонение высоты движения от заданного значения, реализуется при отказах каналов управления элеронами и закрылками. В этом случае рекомендуется переводить эти каналы в режим демпфирования или простого ручного управления. При отказе секций флапперонов наблюдается незначительное увеличение безопасных высот движения экраноплана.

7. Особенностью руля высоты является то, что его четыре внутренних секции работают от СУД в диапазоне отклонений  $|\delta_v| \leq 8^\circ$ , а четыре внешние секции - от системы ручного управления РВ. Следовательно, наиболее тяжелые последствия отказа секций РВ, наблюдаются при поломке одной из крайних секций. При этом в первые  $5 \div 10$  с отказа, наблюдается снижение высоты, вплоть до контакта корпуса судна с экраном. Восстановление режима установившегося движения после отказа секции РВ может быть осуществлено посредством корректировки балансировочного положения РВ в режиме ручного управления.

8. Восстановить прямолинейный режим движения судна после отказа секции руля направления можно, перейдя на ручное управление РН в сочетании со специальным заданием бортовой несимметрии по тяге главных двигателей. Подобный алгоритм исключает режим работы исправной секции РН на ограничении.

### Литература

1. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Комашинский В.И., Стариченков А.Л. Управление движением экранопланов в нормальных и аварийных условиях // Морские интеллектуальные технологии. 2020. Т.1 № 1 (47). С. 38-44.
2. Богданов А. И. Разработка первых международных требований к безопасности экранопланов // Морской вестник. 2005. №1. С. 69—82.
3. Афрамеев Э.А. Глобальная международная система морской безопасности на основе тяжелых экранопланов // Судостроение. 2001. № 4. С. 9 - 11.
4. Богданов А.Г., Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Синтез оптимальных энергетических характеристик гидроприводов систем управления движением // Морские интеллектуальные технологии. 2017. Т2 № 2(36). С. 47-54.
5. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Безотказность систем управления движением // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т.1 № 1 (39). С. 185-194.
6. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Маринов М.Л., Турусов С.Н. Перспективы совершенствования судовых систем управления движением // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т3 № 3 (45). С. 64-70.
7. Лопаницын Д.Е., Стрелков В.В., Уткина Е.Е. Разработка математической модели влияния экрана для задач динамики полета на основе двухпараметрической аппроксимации результатов аэродинамического эксперимента // Техника воздушного флота. 2007. №2 (685). С 37-41.
8. Диомидов В.Б.. Автоматическое управление движением экранопланов.- СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 1996. – 204 с.
9. Каминский В.Ю., Долгова М.А. Перспективные виды транспорта для труднодоступных регионов Российской Федерации // В сборнике: «Транспорт России: проблемы и перспективы - 2016» материалы Международной научно-практической конференции. 2016. С. 66-78.
10. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Анализ и перспективы развития скоростных судов // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-3 (41). С. 10-20.
11. Скороходов Д.А., Стариченков А.Л., Каминский В.Ю. Конструктивная безопасность высокоскоростного водного транспорта. -СПб.: ИПАВУЗ, 2020 - 278 с.

### References

1. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Komashinsky V.I., Starichenkov A.L. Upravlenie dvizheniem ekranoplanov v normal'nyh i avarijnyh usloviyah [Controlling the movement of ekranoplans in normal and emergency conditions] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. V.1 № 1 (47). pp. 38-44.
2. Bogdanov A. I. Razrabotka pervyh mezhdunarodnyh trebovanij k bezopasnosti ekranoplanov [Development of the first international requirements for the safety of ekranoplanes] // Morskoj vestnik. 2005. №1. pp. 69-82.
3. Aframeev E.A. Global'naya mezhdunarodnaya sistema morskoy bezopasnosti na osnove tyazhelyh ekranoplanov [Global international Maritime security system based on heavy screen planes] // Sudostroenie. 2001. № 4. pp. 9 - 11.
4. 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. V2 № 2(36). pp. 47-54.
5. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Bezotkaznost' sistem upravleniya dvizheniem [Fault-free motion control systems] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. V1 № 1 (39). pp. 185-194.
6. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Marinov M.L., Turusov S.N. Perspektivy sovershenstvovaniya sudovyh sistem upravleniya dvizheniem [Prospects for improving ship traffic management systems] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. V3 № 3 (45). pp. 64-70.
7. Lopanicyn D.E., Strelkov V.V., Utkina E.E. Razrabotka matematicheskoy modeli vliyaniya ekrana dlya zadach dinamiki poleta na osnove dvuhparametricheskoy approksimacii rezul'tatov aerodinamicheskogo eksperimenta [Development of a mathematical model of the screen effect for flight dynamics problems based on a two-parameter approximation of the results of an aerodynamic experiment] // Tekhnika vozdušnogo flota. 2007. №2 (685). pp. 37-41.
8. Diomidov V.B. Avtomaticheskoe upravlenie dvizheniem ekranoplanov [Automatic control of the movement of ekranoplans]. SPb. GNC RF. CNII «Elektropribor». 1996. 204 p.
9. Kaminsky V.YU., Dolgova M.A. Perspektivnye vidy transporta dlya trudnodostupnyh regionov Rossijskoj federacii [Promising types of transport for remote regions of the Russian Federation] // V sbornike: «Transport Rossii: problemy i perspektivy - 2016» materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2016. pp. 66-78.
10. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Analiz i perspektivy razvitiya skorostnyh sudov [Analysis and prospects for the development of high-speed vessels] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-3 (41). pp. 10-20.
11. Skorohodov D.A., Starichenkov A.L., Kaminsky V.Yu. Konstruktivnaya bezopasnost' vysokoskorostnogo vodnogo transporta [Structural safety of high-speed water transport]. SPb. IPAVUZ. 2020. 278 p.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**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, 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; профессор кафедры, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, e-mail: skorohodda@mail.ru

**Алексей Леонидович Стариченков**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, alstar72@yandex.ru

**Valery Yu. Kaminsky**, senior lecturer, Ph.D. (Eng), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

**Dmitriy A. Skorokhodov**, professor, Dr. Sci. (Eng), Chief researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; Professor of Department, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, Professor Popov str., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: skorohodda@mail.ru

**Alexey L. Starichenkov**, senior lecturer, Dr. Sci. (Eng), Head of department, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, Professor Popov str., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: alstar72@yandex.ru



УДК 629.5.062.13

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.004

## Исследование аварийных ситуаций, вызванных отказом главных двигателей экраноплана

В.Ю. Каминский<sup>1</sup>, Д.А. Скороходов<sup>1</sup>, А.А. Таранцев<sup>1,2</sup>, М.Л. Маринов<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, <sup>2</sup>Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России

**Аннотация.** В статье выполнен анализ лётных характеристик экраноплана с включенной системой стабилизации скорости. Рассмотрен сценарий, в котором после отказа двигателя пилот подключает ранее не работавший двигатель, находившийся в режиме авторотации. Учитывается отказ одного двигателя, поскольку вероятность одновременного отказа двух и большего числа двигателей мала. Рассмотрены различные режимы движения экраноплана по высоте полёта и числу работающих двигателей. Делается допущение, что при отказе двигателя сброс тяги происходит мгновенно. Набор тяги двигателем после подключения осуществляется в соответствии с инструкцией по обслуживанию двигателя. Принята временная характеристика запуска двигателя, находившегося ранее в режиме авторотации, аналогичная действиям пилотов экраноплана, движущегося со скоростью 400 км/час. После прогрева запускаемого двигателя он подключается к системе автоматической стабилизации скорости и выходит на требуемый тяговый режим. Считается, что подключение двигателя к системе автоматической стабилизации скорости и выход на требуемую тягу происходят мгновенно.

**Ключевые слова:** экраноплан, отказ, пилот, режим, двигатель, авторотация, аварийный процесс, система стабилизации, тяга двигателя.

## Investigation of accidents caused by the failure of the main engines of the ekranoplan

Valery Yu. Kaminsky<sup>1</sup>, Dmitriy A. Skorokhodov<sup>1</sup>, Alexander A. Tarantsev<sup>1</sup>, Marin L. Marinov<sup>1</sup><sup>1</sup>Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, Russian Federation, <sup>2</sup>Saint Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia

**Abstract.** The article analyzes the flight characteristics of an ekranoplan with a speed stabilization system enabled. We consider a scenario in which, after an engine failure, the pilot connects a previously inactive engine that was in autorotation mode. One engine failure is taken into account, since the probability of simultaneous failure of two or more engines is small. Various modes of movement of the ekranoplan by flight height and number of working engines are considered. It is assumed that when the engine fails, the thrust is reset instantly. After connecting the engine, the engine thrust is set in accordance with the engine maintenance instructions. The time characteristic of starting the engine, which was previously in autorotation mode, is similar to the actions of the pilots of the ekranoplan, whose speed is 400 km / h. After warming up the starting engine, it is connected to the automatic speed stabilization system and enters the required traction mode. It is assumed that the engine is connected to the automatic speed stabilization system and reaches the required thrust instantly.

**Keywords:** ekranoplan, failure, pilot, mode, engine, autorotation, emergency process, stabilization system, engine thrust.

### Введение

В ряде работ анализировались характеристики высокоскоростного водного транспорта [1,2], при отказах каналов системы управления движением (СУД) [3-8] и отказах электрогидравлических приводов различных устройств управления [9-11]. В работах [12-16] рассмотрены некоторые аспекты влияния работы двигателей на безопасность полёта экраноплана. По мнению авторов необходимо продолжить тему безопасности полёта экраноплана оценкой влияния отказов различного числа двигателей судна для определённых начальных условий.

### 1. Постановка задачи

Проанализируем полёт экраноплана с включённой системой управления движением (СУД). При отказе одного из двигателей пилот вводит в действие работоспособный двигатель, прежде находившийся в выключенном состоянии. Считаем, что все неработающие двигатели находятся в режиме авторотации.

Допустим, что при отказе двигателя сброс тяги происходит мгновенно. При подключении двигателя набор тяги выполняется в соответствии с инструкцией по обслуживанию двигателя. Временная характеристика запуска двигателя, находившегося в режиме авторотации, при скорости движения экраноплана около 400 км/час имеет следующие параметры:

$O_1$  – момент выхода из строя одного из работавших двигателей;

$O_2$  – момент времени подключения одного из двигателей, находившегося в режиме авторотации;

$t_0$  – время ( $t_0 \cong 60$ с), потребное для:

- обнаружения аварии отказавшего двигателя;
- обмена информацией между пилотом и механиком;
- принятия решения о подключении двигателя, находящегося в режиме авторотации;
- осуществления подготовительных операций по его запуску.

$t_1$  – время ( $t_1 \cong 105$ с) выхода на режим малого газа (МГ) - время отработки программного устройства и раскрутки двигателя.

$t_2$  – время ( $t_2 \cong 45$ с) прогрева на режиме МГ.

$t_3$  – время вывода двигателя на режим 0,7 ( $t_3 \cong 30c$ ) – время набора оборотов и тяги двигателя.

$t_4$  – время прогрева двигателя на режиме 0,7 ( $t_4 \cong 150c$ ).

После прогрева на режиме 0,7 двигатель механически подключается к системе автоматической стабилизации скорости и выходит на требуемый режим по тяге. Этот процесс длится около 5с. Приблизительно можно считать, что подключение двигателя к системе автоматической стабилизации скорости с выходом на требуемую тягу, происходит мгновенно.

Представим диапазон допустимых балансировочных режимов при различных количествах подключенных двигателей:

$$\delta_{м.бал.} = f(n_{\delta\delta}, G, \bar{h}_{бал}), \quad (1)$$

где:  $n_{\delta\delta}$  – частота вращения двигателя,  $G$  – вес экраноплана,  $v_{бал}$  – тангаж экраноплана для балансировочного режима движения на высоте  $\bar{h}_{бал}$ ,  $\delta_{з.бал}$  – отклонение закрылков для балансировочного режима движения.

Соотношение (1) выполняется при  $v_{бал} = 1,0^\circ$  и  $\delta_{з.бал} = 0^\circ$ , для диапазона весовых состояний:  $G = G_{\min} \div G_{\max}$  и относительных высот движения:  $\bar{h} = 0,15 \div \infty$ . Для имитации  $\bar{h} = \infty$  при моделировании принималось  $\bar{h} = 2,0$ .

## 2. Результаты моделирования

Исследования показали, что при числе работающих двигателей -  $n_{дв} = 4, 6, 8$ , нормальные режимы движения в диапазоне всех весовых состояний и высот, обеспечиваются потребной тягой двигателей, без выхода в область форсажных режимов работы.

Если же функционирует три двигателя и  $G = G_{\max}$ , а  $\bar{h}_{бал} \geq 0,59$  – сектора газа двигателей достигают механических ограничителей, что свидетельствует о нехватке тяги двигателей. При этом для  $n_{дв} = 3$ ,  $G = G_{\max}$  и  $\bar{h}_{бал} \cong 0,286 \div 0,59$  потребные характеристики двигателей лежат в области форсажных режимов. Следовательно, если при работе пяти и семи двигателей экраноплан обеспечивается потребной тягой во всем диапазоне весовых характеристик и высот движения, то при работе трёх двигателей существует область весовых параметров и высот, которая не поддерживается тягой. При движении судна на четырёх двигателях примем во внимание, что двигатель может отказать в любое время и в любом режиме движения. Следовательно, на область балансировочных весовых параметров и высот движения судна в этом случае должны быть наложены ограничения.

Исследования в диапазоне характеристик:  $G = G_{\min}$ ;  $v_{бал} = 1^\circ$ ,  $\delta_{з.бал} = 0$  и  $\bar{h} = 2,0$  при четырёх работающих двигателях показали необходимость дополнительного запуска еще одной пары двигателей, а при  $G = G_{\max}$  и шести работающих двигателях также необходимо запустить одну пару двигателей. Работающие и запускаемые двигатели

располагаются симметрично диаметральной плоскости экраноплана.

Запуск дополнительной пары двигателей в полете экраноплана не вызывает опасных динамических возмущений, влияющих на полёт судна. При запуске происходит некоторое увеличение скорости и связанное с этим увеличение высоты движения. Например, при  $n_{дв} = 4 - 6$ , эти параметры меняются в пределах: изменение скорости движения -  $\Delta v_{\max 1} \cong + 3,3$  м/с; высоты движения -  $\Delta H_{\max 1} \cong + 0,66$  м и угла тангажа -  $\Delta v_{\max 1} \cong + 0,13^\circ$ . Указанные изменения параметров реализуются в период  $t = 180 \div 200$  сек.

После подключения запускаемых двигателей к системе стабилизации скорости все двигатели переходят на новый режим работы с уменьшенным на  $10 \div 15^\circ$  отклонением секторов газа, что сопровождается при  $n_{дв} = 4-6$  в период  $t \cong 330 \div 350c$  некоторым снижением скорости, высоты движения и угла тангажа соответственно:  $\Delta v_{\max 2} \cong - 2$  м/с;  $\Delta H_{\max 2} \cong - 0,2$  м;  $\Delta v_{\max 2} \cong - 0,12^\circ$ . К 500с переходного процесса колебания характеристик, связанные с дополнительным подключением пары двигателей, практически прекращаются.

При переходе с шести на восемь двигателей амплитуда отклонения параметров в процессе подключения двигателей значительно меньше. При отказе одного из работающих двигателей и последующем запуске другого, в соответствии с временной характеристикой запуска, в случае отказа двигателя сброс тяги считается мгновенным. Запуск двигателя начинается через 60с после отказа. Запускаемый двигатель располагается на том же борту, что и отказавший.

Исследования показали, что динамические отклонения параметров движения экраноплана, (высоты движения, крена, тангажа), вызванные отказом двигателя в режиме полета на экране, к моменту набора тяги подключённым двигателем ( $t \cong 220c$ ), практически затухают. Максимальные отклонения по высоте и скорости движения судна при отказе и подключении двигателя противоположны по знаку и практически совпадают по величине. Наиболее опасными являются динамические отклонения параметров движения, связанные с отказами двигателей, т.к. в этом случае происходит снижение скорости и высоты движения, что может привести к контакту корпуса экраноплана с экранной поверхностью.

## 3. Отказ одного двигателя

Рассмотрим ситуацию с отказом одного из четырёх двигателей при максимальном весе судна ( $G = G_{\max}$ ) и большой относительной высоте

движения  $\bar{h} = 2,0$ . Примерно через 100с после отказа двигателя резко падает высота движения. При начальной высоте  $H = 27$  м ( $\bar{h} = 2,0$ ) судно за 50с снижается до высоты  $H = 6$  м, т.е. «просаживается» на 21 м со скоростью  $0,7 \div 0,9$  м/с. Причина резкого снижения - нехватка тяги, сопровождающаяся: выходом секторов газа работающих двигателей на ограничители (угол отклонения сектора газа  $\delta_r = 112^\circ$ ), перекладкой закрылков вниз на ограничители, снижением скорости движения на  $16 \div 17$  м/с и изменением угла тангажа до  $-0,25^\circ$ . Несмотря на то,

что в рассмотренном случае не происходит контакта корпуса судна с экранной поверхностью, резкое падение высоты психологически травмирует пилотов и может привести их к ошибкам в управлении. Данный отказ следует расценивать как событие, которое может предопределить аварийную ситуацию.

Развитие ситуации при отказе одного из четырёх работающих двигателей с подключением исправного двигателя, находившегося в режиме авторотации, с учётом временной характеристики показало, что в этом случае начальная фаза поведения экраноплана (до  $t = 150c$ ) практически совпадает с описанными выше случаями, связанными с подключением

двигателя. После 200с, когда подключаемый двигатель начинает набирать тягу, параметры движения возвращаются к исходному балансирующему состоянию, и, к 500с, можно считать, что динамические процессы, вызванные отказом двигателя, прекращаются.

Характеристика движения судна при отказе одного из четырёх двигателей для параметров:  $G = G_{max}$ ;  $\bar{h}_{бал} = 0,15$  и  $0,35$ ;  $V_{бал} = 1,0$  и  $\delta_{збал} = 0^\circ$ ;  $G = G_{min}$ ;  $\bar{h}_{бал} = 0,15 \div \infty$ ;  $V_{бал} = 1,0$  и  $\delta_{збал} = 0^\circ$  представлена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика переходного процесса при аварии одного из четырёх двигателей

Максимальные отклонения параметров	$G = G_{max}$		$G = G_{min}$	
	$\bar{h} = 0,35$	$\bar{h} = 0,15$	$\bar{h} = \infty$	$\bar{h} = 0,15$
$\Delta H_{max}$ (м) (высота)	-0,4	-0,2	-0,58	-0,13
$\Delta V_{max}$ (м/с) (скорость)	-3,0	-2,0	-3,0	-1,3
$\Delta \gamma_{max}$ (град) (крен)	-	+0,08	+0,43	+0,08
$\Delta \nu_{max}$ (град) (тангаж)	-0,04	-0,06	0,03	-0,06

Исследования показали, что отказ одного из двигателей в случаях, рассмотренных выше, полностью компенсируется увеличением тяги оставшихся в работе двигателей, а также отклонением руля направления и элеронов.

Характеристика лётных качеств экраноплана при отказе одного из шести двигателей при условиях:

$G = G_{max}$ ;  $\bar{h}_{бал} = 0,15 \div \infty$ ;  $V_{бал} = 1,0$  и  $\delta_{збал} = 0^\circ$ ;  $G =$

$G_{min}$ ;  $\bar{h}_{бал} = 0,15 \div \infty$ ;  $V_{бал} = 1,0$  и  $\delta_{збал} = 0^\circ$ , а также, при отказе одного из восьми двигателей:  $G = G_{max}$ ;  $\bar{h}_{бал} = 0,15 \div \infty$ ;  $V_{бал} = 1,0^\circ$  и  $\delta_{збал} = 0^\circ$ ;  $G = G_{min}$ ;  $\bar{h}_{бал} = 0,15 \div \infty$ ;  $V_{бал} = 1,0^\circ$  и  $\delta_{збал} = 0^\circ$  приведена в табл.2. и табл.3.

Таблица 2

Характеристика переходного процесса при аварии одного из шести двигателей

Максимальные отклонения параметров	$G = G_{max}$		$G = G_{min}$	
	$\bar{h} = \infty$	$\bar{h} = 0,15$	$\bar{h} = \infty$	$\bar{h} = 0,15$
$\Delta H_{max}$ (м)	-0,31	-0,08	-0,26	-0,05
$\Delta V_{max}$ (м/с)	-1,95	-0,95	-1,5	-0,06
$\Delta \gamma_{max}$ (град)	0,28	0,06	0,28	0,06
$\Delta \nu_{max}$ (град)	0,02	-0,035	0,025	-0,03

Таблица 3

Характеристика переходного процесса при аварии одного из восьми двигателей

Максимальные отклонения параметров	$G = G_{max}$		$G = G_{min}$	
	$\bar{h} = \infty$	$\bar{h} = 0,15$	$\bar{h} = \infty$	$\bar{h} = 0,15$
$\Delta H_{max}$ (м)	-0,18	-0,05	-0,16	-0,05
$\Delta V_{max}$ (м/с)	-1,2	-0,55	-0,09	-0,45
$\Delta \gamma_{max}$ (град)	0,21	0,05	0,21	0,05
$\Delta \nu_{max}$ (град)	0,01	-0,02	0,01	-0,015

Во всех рассмотренных случаях отказ одного из двигателей не является опасным, полностью компенсируется увеличением тяги работающих двигателей и отклонениями рулей направления и элеронов, которые не достигают зоны ограничений.

**4. Оценка высотного запаса**

Выполнена приближенная оценка амплитуды снижения («просадки») экраноплана при отказах одного из работающих двигателей. При  $n_{дв} = 4$ ;  $G =$

$G_{max}$  и  $\bar{h} = \infty$ , «просадка» судна может составлять десятки метров. Подобный сценарий не рассматривался. Максимальная «просадка» при отказах двигателя оценивалась при заданном движении экраноплана на четырёх, шести и восьми двигателях в рамках всего диапазона весовых состояний и относительных высот. Таблица расчётных значений просадок позволяет пилотам судна выбрать безопасную высоту полёта,

исключающую контакт корпуса экраноплана с поверхностью экрана в случае внезапного отказа одного из двигателей при любых значениях весовых состояний  $G = G_{\min} \div G_{\max}$  и высот движения  $\bar{h} = 0,15 \div \infty$ .

Для определения величины запаса по высоте ( $H_3$ ), воспользуемся значениями максимальных отклонений параметров, приведенных в табл. 1-3.

Анализ показал следующее. Если максимум отклонений по тангажу примерно совпадает с максимумом отклонений по высоте, то максимум отклонений по высоте и по крену не совпадают по времени. Причем отклонения по крену, при максимальных отклонениях по высоте, составляют - при  $n_{дв} = 4$ :  $\Delta\gamma = 0,3\Delta\gamma_{\max}$ ; при  $n_{дв} = 6$ :  $\Delta\gamma = 0,4\Delta\gamma_{\max}$ ; при  $n_{дв} = 8$ :  $\Delta\gamma = 0,4\Delta\gamma_{\max}$ .

При отклонениях по тангажу, наиболее опасными, с точки зрения «просадок» корпуса, являются отклонения от отрицательных углов тангажа. Отрицательные углы отклонений больше положительных и, к тому же, отклонения «в нос» действуют на значительно большем плече.

С учетом вышеизложенного для оценки запаса по высоте при отказе двигателя предложена приближенная зависимость:

$$H_3 = \Delta H_{\max} - (0,3 + 0,4)l_{\gamma} \frac{\Delta\gamma_{\max}}{57,3} + l_v \frac{\Delta v_{\max}}{57,3}, \quad (2)$$

где:  $\Delta H_{\max}$ ,  $\Delta\gamma_{\max}$  и  $\Delta v_{\max}$  приведены в табл. 1-3.

Оценка запаса высоты с помощью приближенной формулы (2) и данных табл. 1-3 выполняется следующим образом. При  $n_{дв} = 4$ , значения  $\Delta H_{\max}$  берутся для  $G = G_{\min}$  и  $\bar{h} = \infty$ , а величины  $\Delta v_{\max}$  - для  $\bar{h} = 0,15$ . При  $n_{дв} = 6$  и 8, значения  $\Delta H_{\max}$  и  $\Delta\gamma_{\max}$  берутся для  $G = G_{\max}$  и  $\bar{h} = \infty$ , а  $\Delta v_{\max}$  - для  $G = G_{\min}$  и  $\bar{h} = 0,15$ . Плечо по крену принято  $l_{\gamma} = \frac{l}{2} = 20,4$  м, а плечо по тангажу -  $l_v = 16,9$  м. В соответствии с назначенными начальными и граничными условиями получены

следующие величины запаса по высоте: при  $n_{дв} = 4$  -  $H_3 \cong -0,64$  м; - при  $n_{дв} = 6$  -  $H_3 \cong -0,36$  м; при  $n_{дв} = 8$  -  $H_3 \cong -0,22$  м.

### Заключение

1. Отказ одного из восьми или шести двигателей в различных условиях полёта экраноплана не представляет опасности, поскольку полностью компенсируется увеличением тяги двигателей, оставшихся в работе, отклонением элеронов и рулей направления, предельное положение которых отстоит от зоны ограничений.

2. При работе трёх двигателей существует область весовых состояний и высот движения судна, которая не обеспечивается потребной тягой двигателей. Поэтому при движении судна на четырёх двигателях должны накладываться ограничения на область балансировочных весовых состояний и высот.

3. Запуск дополнительной пары двигателей в полете экраноплана не вызывает опасных динамических возмущений.

4. При весе экраноплана близком к  $G_{\max}$  и относительном удалении от экранной поверхности  $\bar{h} \geq 0,59$  движение экраноплана на четырёх двигателях не рекомендуется, т.к. отказ одного из двигателей, вследствие нехватки тяги, приводит к глубокому провалу по высоте со значительной скоростью, что следует рассматривать как аварийную ситуацию.

5. При движении на четырёх двигателях для произвольного веса экраноплана и при относительной высоте  $\bar{h} = 0,15 \div 0,35$  безопасность движения при внезапном отказе одного из работающих двигателей обеспечивается запасом исходной высоты движения в 0,64 м.

6. При движении во всем диапазоне весов:  $G_{\min} \div G_{\max}$  и при относительной высоте  $\bar{h} = 0,15 \div \infty$ , безопасность, при внезапном отказе одного из работающих двигателей, обеспечивается запасом исходной высоты: при движении на шести двигателях - на 0,36 м; при движении на восьми двигателях - на 0,22 м.

### Литература

1. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Анализ и перспективы развития скоростных судов // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-3 (41). С. 10-20.
2. Каминский В.Ю., Долгова М.А. Перспективные виды транспорта для труднодоступных регионов Российской Федерации // В сборнике: «Транспорт России: проблемы и перспективы - 2016» материалы Международной научно-практической конференции. 2016. С. 66-78.
3. Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Исследование энергетических характеристик исполнительных приводов систем управления движением судна на подводных крыльях // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4-4 (42). С. 65-70.
4. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Безотказность систем управления движением // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т.1 № 1 (39). С. 185-194.
5. Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Исследование алгоритмической структуры системы управления движением судна на подводных крыльях // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 1-1 (39). С. 153-163.
6. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Маринов М.Л., Турусов С.Н. Перспективы совершенствования судовых систем управления движением // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т3 № 3 (45). С. 64-70.
7. Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Управление движением судов на подводных крыльях в нормальных и аварийных ситуациях // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 2-2 (40). С. 127-138.



8. Скороходов Д.А., Каминский В.Ю. Алгоритмы функционирования судовых интегрированных систем управления в различных режимах // В сборнике: «Технологии построения когнитивных транспортных систем» материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 97-104.
9. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Комашинский В.И., Стариченков А.Л. Управление движением экранопланов в нормальных и аварийных условиях // Морские интеллектуальные технологии. 2020. Т.1 № 1 (47). С. 38-44.
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. Богданов А.Г., Каминский В.Ю., Скороходов Д.А. Синтез оптимальных энергетических характеристик гидроприводов систем управления движением // Морские интеллектуальные технологии. 2017. Т2 № 2(36). С. 47-54.
12. Скороходов Д.А., Стариченков А.Л., Каминский В.Ю. Конструктивная безопасность высокоскоростного водного транспорта. -СПб.: ИПАВУЗ, 2020 - 278 с.
13. Диомидов В.Б.. Автоматическое управление движением экранопланов.- СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 1996. – 204 с.
14. Афремов Э. А. Перспективы экранопланостроения // Судостроение. 2000. №1. С. 9 - 13.
15. Афремов Э.А. Глобальная международная система морской безопасности на основе тяжелых экранопланов // Судостроение. 2001. № 4. С. 9 - 11.
16. Лопаницын Д.Е., Стрелков В.В., Уткина Е.Е. Разработка математической модели влияния экрана для задач динамики полета на основе двухпараметрической аппроксимации результатов аэродинамического эксперимента // Техника воздушного флота. 2007. №2 (685). С 37-41.

#### References

1. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Analiz i perspektivy razvitiya skorostnyh sudov [Analysis and prospects for the development of high-speed vessels] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-3 (41). pp. 10-20.
2. Kaminsky V.Yu., Dolgova M.A. Perspektivnye vidy transporta dlya trudnodostupnyh regionov Rossijskoj federacii [Promising types of transport for remote regions of the Russian Federation] // V sbornike: «Transport Rossii: problemy i perspektivy - 2016» materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2016. pp. 66-78.
3. Kaminsky V.Yu., Marinov M.L., Skorohodov D.A., Turusov S.N. Issledovanie energeticheskikh harakteristik ispolnitel'nyh privodov sistem upravleniya dvizheniem sudna na podvodnyh kryl'yah [The study of the energy characteristics of the actuators of the motion control system of the hydrofoil] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 4-4 (42). pp. 65-70.
4. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Bezotkaznost' sistem upravleniya dvizheniem [Fault-free motion control systems] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. V1 № 1 (39). pp. 185-194.
5. Kaminsky V.Yu., Marinov M.L., Skorohodov D.A., Turusov S.N. Issledovanie algoritmicheskoy struktury sistemy upravleniya dvizheniem sudna na podvodnyh kryl'yah [Investigation of the algorithmic structure of the hydrofoil motion control system] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-1 (39). pp. 153-163
6. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Marinov M.L., Turusov S.N. Perspektivy sovershenstvovaniya sudovyh sistem upravleniya dvizheniem [Prospects for improving ship traffic management systems] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2019. V3 № 3 (45). pp. 64-70.
7. Kaminsky V.Yu., Marinov M.L., Skorohodov D.A., Turusov S.N. Upravlenie dvizheniem sudov na podvodnyh kryl'yah v normal'nyh i avarijnyh situacijah [Hydrofoil traffic management in normal and emergency situations] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 2-2 (40). pp. 127-138.
8. Skorohodov D.A., Kaminsky V.Yu. Algoritmy funkcionirovaniya sudovyh integrirovannyh sisitem upravleniya v razlichnyh rezhimah [Algorithms of ship integrated control systems functioning in various modes] // V sbornike: «Tekhnologii postroeniya kognitivnyh transportnyh sistem» materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2019. pp. 97-104.
9. Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Komashinsky V.I., Starichenkov A.L. Upravlenie dvizheniem ekranoplanov v normal'nyh i avarijnyh usloviyah [Controlling the movement of ekranoplans in normal and emergency conditions] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2020. V.1 № 1 (47). pp. 38-44.
10. Bogdanov A.G., Kaminsky V.Yu., Skorohodov D.A., Chernenko V.I. Vybor osnovnyh energeticheskikh harakteristik ispolnitel'nogo privoda aeroulya sudna na vozduшной podushke [Selection of the main energy characteristics of the Executive drive of the air rudder of the hovercraft] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2017. V.3 №4 (38). pp. 79-83.
11. 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. V2 № 2(36). pp. 47-54.
12. Skorohodov D.A., Starichenkov A.L., Kaminsky V.Yu. Konstruktivnaya bezopasnost' vysokoskorostnogo vodnogo transporta [Structural safety of high-speed water transport]. SPb. IPAVUZ. 2020. 278 p.
13. Diomidov V.B. Avtomaticheskoe upravlenie dvizheniem ekranoplanov [Automatic control of the movement of ekranoplans]. SPb. GNC RF. CNII «Elektropribor». 1996. 204 p.
14. Afremov E. A. Perspektivy ekranoplanostroeniya [The prospect of building ekranoplans] // Sudostroenie. 2000. №1. pp. 9 - 13.

15. Afremov E.A. Global'naya mezhdunarodnaya sistema morskoy bezopasnosti na osnove tyazhelyh ekranoplanov [Global international Maritime security system based on heavy screen planes] // Sudostroenie. 2001. № 4. pp. 9 - 11.
16. Lopanicyn D.E., Strelkov V.V., Utkina E.E. Razrabotka matematicheskoy modeli vliyaniya ekrana dlya zadach dinamiki poleta na osnove dvuhparametricheskoy approksimacii rezul'tatov aerodinamicheskogo eksperimenta [Development of a mathematical model of the screen effect for flight dynamics problems based on a two-parameter approximation of the results of an aerodynamic experiment] // Tekhnika vozdushnogo flota. 2007. №2 (685). pp. 37-41.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**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, 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; профессор кафедры, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, e-mail: skorohodda@mail.ru

**Александр Алексеевич Таранцев**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, д. 13; профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149, e-mail: t\_5l.ru4@mail.ru

**Марин Любенов Маринов**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 12 линия, 13, e-mail: marinlomsky@gmail.com

**Valery Yu. Kaminsky**, senior lecturer, Ph.D. (Eng), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

**Dmitriy A. Skorokhodov**, professor, Dr. Sci. (Eng), Chief researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; Professor of Department, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, Professor Popov str., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: skorohodda@mail.ru

**Alexander A. Tarantsev**, professor, Dr. Sci. (Eng), Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences, Address 13, 12-th Line Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, Professor of the Department of Firefighting and Rescue Operations, St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 149, Moskovsky, St. Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: t\_5l.ru4@mail.ru

**Marin L. Marinov**, Ph.D. (Eng), leading researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: marinlomsky@gmail.com

УДК 629.5.01  
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.046

## Оптимизация характеристик контейнерного судна с учетом прогнозируемой цены его постройки и эксплуатации

Ю.П. Буров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Российский Морской Регистр Судоходства. Новороссийский филиал

**Аннотация** Представленная статья описывает оптимизацию характеристик контейнерного судна с учетом прогнозируемой цены его постройки и эксплуатации. В совокупности с грамотно составленным технико-экономическим обоснованием проект судна имеет хорошие шансы на то, чтобы заинтересовать Заказчика и быть воплощенным в жизнь на судостроительной верфи. В качестве исследуемого типа объекта в статье выбрано контейнерное судно. На основании исходных технических данных составлена математическая модель судна, учитывающая самые важные мореходные качества системы и ее экономические показатели. Далее, интегрированный алгоритм оптимизации методом случайного поиска рассчитывает множество вариантов будущего судна и выбирает наименее дорогой. В качестве минимизируемого критерия эффективности выбрана цена постройки и дальнейшей эксплуатации судна. Особенностью работы является прогнозирование цен на основные судостроительные материалы, которое позволяет рассчитать стоимость судна на расчетную дату закладки киля и задолго до начала его постройки определить целесообразность реализации проекта в целом. Оперативное проведение всех вышеперечисленных операций проводится с помощью реализованного программно-методического комплекса «Архелон», образцы интерфейсов которого представлены в статье. Описанный метод оценки эффективности позволяет сэкономить временные и финансовые ресурсы, оптимизировать характеристики системы и сравнить ее с аналогичными судами-прототипами.

**Ключевые слова:** оптимизация, проектирование контейнерного судна, мореходные качества, экономические показатели, математическая модель, прогнозирование временного ряда, цены на мировые ресурсы, стоимость постройки судна, стоимость эксплуатации судна.

## Optimization of the container ship's characteristics considering the projected cost of its construction and operation

Yury P. Burov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Russian Maritime Register of Shipping. Novorossiysk branch

**Abstract.** Presented article describes how to optimize the characteristics of a container ship taking into account the projected cost of its construction and operation. In conjunction with a competently drawn up feasibility evaluation, the project of the vessel has good chances to interest the Customer and be implemented at the shipyard. A container ship is chosen as the type of object under study in the article. On the basis of the initial conditions, a simulation model of the vessel is compiled, taking into account the most important seaworthiness of the system and its economic indicators. Afterwards, an integrated random search optimization algorithm calculates a set of future vessel variants and chooses the least expensive. The cost of construction and further operation of the vessel was chosen as a minimizing criterion of efficiency. The peculiarity of the work lies in the fact that the forecasting prices for basic shipbuilding materials allows to determine the cost of the vessel on the planning date of build and long before the beginning of its construction to determine the feasibility of the project generally. Operational implementation of all above-listed operations are provided due to created software "Archelon", which interfaces are presented in the article as examples. The described method of efficiency assessment allows to save time and financial resources, optimize system's parameters and compare it with similar prototype vessels.

**Key words:** optimization, container ship design, seaworthiness, economic indicators, simulation model, time series forecasting, world resource prices, ship construction cost, ship operation cost.

### Введение

На сегодняшний день каждое судно проектируется и строится с целью получения определенной выгоды. В подавляющем большинстве случаев это прибыль от перевозки наливных, навалочных и других видов грузов или пассажиров. Постройка и эксплуатация судна - очень дорогостоящий и трудоемкий процесс, вот почему оценка эффективности проекта должна проводиться на самом раннем этапе проектирования. Эффективность – степень достижения цели создания [1]. Другими словами, только проект с достаточной эффективностью будет выбран Заказчиком для постройки, а значит без ее определения невозможно доказать право проекта на его реализацию в жизнь. В условиях современной рыночной экономики, проблема оценки

эффективности или нахождения «оптимального варианта системы» – необходимый и неотъемлемый этап создания судна, который представляет собой одну из самых ответственных частей обоснования проекта.

### 1. Цели: построение математической модели проектирования, особенности расчетов и общая блок-схема

Для решения вышеуказанной проблемы необходимо решить многоступенчатую задачу, первым этапом которой будет создание математической модели судна – описания с помощью формул, уравнений, неравенств, логических операторов, качеств судна как сложной технической системы [2]. На практике может применяться большое количество типов математических моделей с различными

параметрами. Выбор этих параметров – важная и ответственная задача, т.к. именно на основании их расчета будет сделан вывод о целесообразности постройки судна. Если мы имеем дело с каким-либо конкретным типом судна, то должны быть учтены его особенности: контейнеровместимость для контейнерных судов, пассажировместимость для пассажирских судов.

В данной работе была использована математическая модель контейнерного судна, реализованная в программе «Архелон», подробнее которая будет описана позже. При расчетах использовались следующие разделы - расчет главных размерений и коэффициентов полноты (плавучесть), определение нагрузки и вместимости, сопротивление движению судна, параметры гребного винта, остойчивость, оценка прочности судна, построение теоретического чертежа, элементы общего расположения, расчет контейнеровместимости, экономические показатели. Каждый из вышеуказанных разделов содержит в себе набор математических зависимостей и позволяет определять характеристики судна. На конечной стадии, в разделе «экономические показатели», вычисляется значение одного из главных компонентов системы – стоимости постройки и последующей эксплуатации судна ZPR т.е. общих затрат:

$$ZPR = COC + CSC \quad (1)$$

где CSC – стоимость постройки судна, COC - затраты на расчетный период эксплуатации судна. Так как контейнерное судно относится к коммерческому типу, то общие затраты по праву выбраны минимизируемым критерием эффективности системы, иначе говоря, ставится задача нахождения оптимального решения при минимизации затрат ресурсов с обязательным условием достижения заданного полезного эффекта (заданная контейнеровместимость) [3].

Чтобы создать максимально эффективную систему, необходимо сравнить тысячи вариантов и выбрать наиболее эффективный. С этой задачей успешно справляется алгоритм оптимизации. На рис. 1 показана общая схема взаимодействия математической модели и алгоритма оптимизации в программе «Архелон».

Для начала работы необходимо ввести требуемые исходные данные. Это значения, которые устанавливаются Проектантом или Заказчиком, исходя из имеющейся задачи, и, остающиеся постоянными до конца всех вычислений: скорость, дальность плавания, необходимая площадь машинного отделения, заданная вместимость контейнеров и другие параметры.

Следующим этапом проводится множество циклов оптимизации (их количество так же может быть задано), в каждом из которых вычисляются параметры проектируемой системы. Другими словами, рассчитываются варианты математической модели будущего судна.

При расчете математической модели некоторые из полученных характеристик проходят проверку на соответствие заданным ограничениям, например, минимальной вместимости контейнеров, минимальному надводному борту. Так, например, проверяется условие достаточной остойчивости судна:

$$F6 = HMETKB - HKBMIN \quad (2)$$

где F6 – показатель выполнения ограничения, HMETKB – рассчитанная метацентрическая высота судна, HKBMIN – минимальная метацентрическая высота, определенная по правилам Российского Морского Регистра Судоходства [4]. Если показатель  $F6 < 0$ , вариант считается неудачным, процедура расчетов обращается к модулю генерации переменной. Генерация переменной – процесс получения нового значения определенной характеристики в допустимом диапазоне. В программе «Архелон» имеется вектор генерируемых переменных, состоящий из пяти компонентов – длины судна, водоизмещения, коэффициента общей полноты, максимального количества контейнеров по ширине судна и максимальное количество контейнеров в ярусе. Первоначальные значения этих переменных задаются пользователем на этапе ввода исходных данных. При нарушении любого из ограничений программа обращается к матрице выбора, которая выбирает индекс генерируемой переменной в зависимости от нарушенного ограничения. После выбора индекса происходит расчет нового значения параметра, в зависимости от того дискретен он или нет. Для переменных, имеющих множество возможных значений используется формула:

$$XNACHj = XOPTi + DELTA \cdot RSL \quad (3)$$

где i – индекс генерируемой переменной, XNACHi – вычисляемая i-ая переменная, XOPTi - текущее оптимальное значение i-ой переменной, DELTA - разность минимального и максимального значения i-ой переменной XMAXi - XMINi, RSL – случайное число в диапазоне [-1;1].

$$XNACHi = XDISyi \quad (4)$$

Формула (4) используется для дискретных переменных (в случае программы «Архелон» это количество контейнеров по ширине судна и максимальное количество контейнеров в ярусе), i – индекс генерируемой дискретной переменной, XNACHi – вычисляемая i-ая переменная, y – порядковый номер дискретной переменной, j – порядковый номер значения y-ой дискретной переменной, XDISyj – полученное значение y-ой дискретной переменной. Выбор XDISyj происходит путем генерации, только не самого значения, а индекса дискретной переменной.



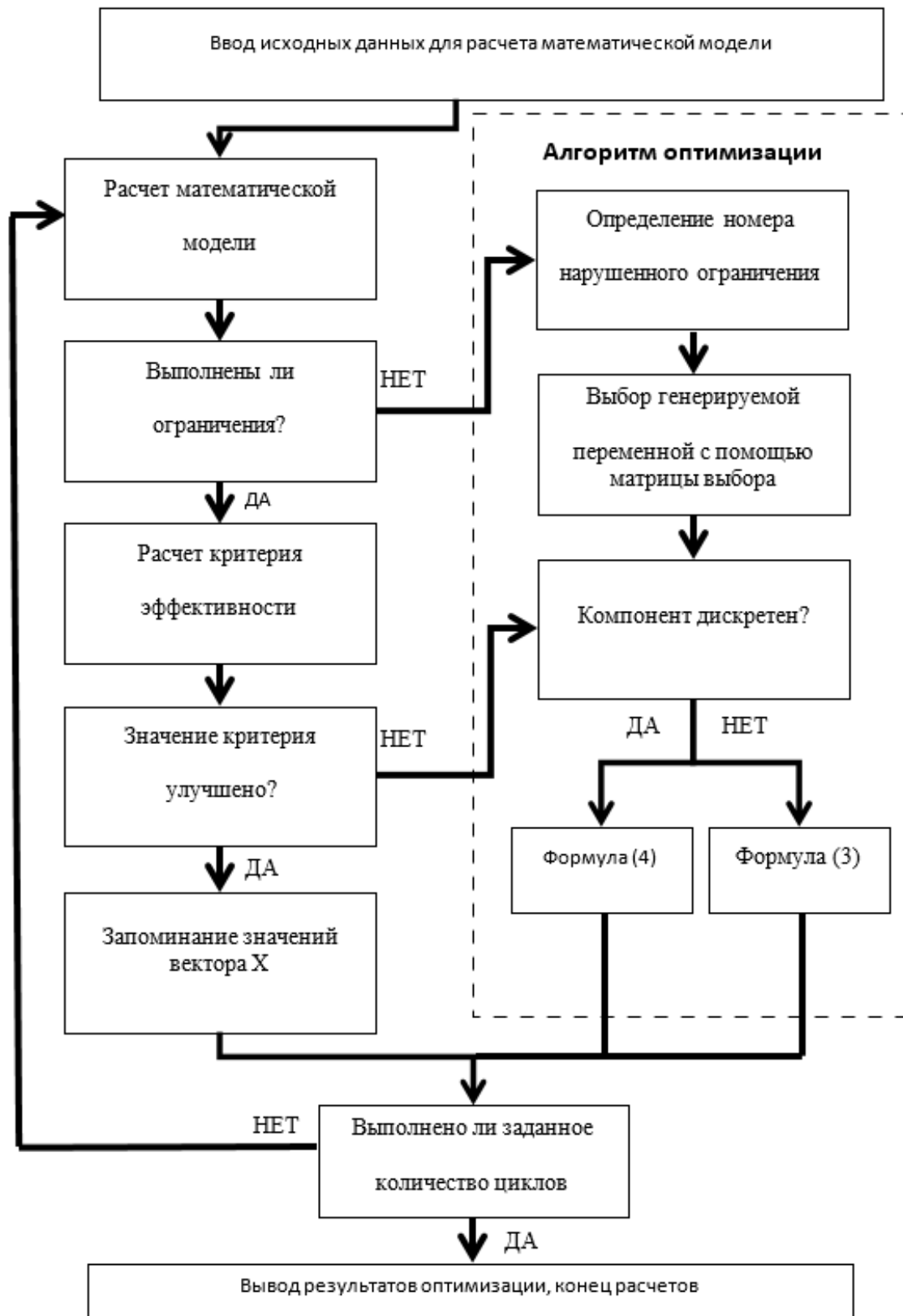


рис. 1 Общая структурная схема функционирования алгоритма оптимизации

После окончания процесса генерации переменной алгоритм оптимизации обращается к модели и передает ей новые значения переменных. Если математическая модель удовлетворяет всем ограничениям, происходит второй этап «проверки»

варианта – сравнение рассчитанного критерия ZPR с оптимальным значением ZOPT. Если  $ZPR < ZOPT$ , то ZOPT принимает значение ZPR. В итоге имеем, что вариант математической модели может называться

«успешным», если удовлетворяет следующим условиям:

$$\left\{ \begin{array}{l} SUMM = 0; \\ ZPR < ZOPT; \end{array} \right. \quad (5)$$

$$(6)$$

где SUMM – количество нарушенных ограничений. Программа «Архелон» при расчетах формирует таблицу успешных вариантов, и, при завершении работы, пользователь может подробно ознакомиться с каждым из них.

Рассмотренный выше способ оптимизации известен как «алгоритм случайного поиска» [5]. С развитием мощностей ЭВМ данный метод получил широкое распространение: он требует большого количества расчетов, но взамен практически гарантирует успешный результат.

## 2. Описание методов прогнозирования на базе биржи

В предыдущем разделе был в общих чертах описан механизм оптимизации математической модели судна, однако для рассмотрения вопроса исследования эффективности системы в среднесрочной перспективе необходимо в математическую модель внедрить зависимость от времени.

Некоторые значения системы могут быть рассчитаны «наперед» с использованием научного предсказания, т.е. прогнозирования [6]. В качестве параметров, в которых были учтены предполагаемые изменения значений во времени, в данной работе были выбраны экономические показатели судна. Суммарная стоимость постройки и эксплуатации судна складывается из десятков других составляющих, величина которых, в свою очередь, зависит от цен на основные ресурсы. Например, цена тонны железной руды напрямую влияет на стоимость постройки корпуса судна, цена тонны топлива – на стоимость эксплуатации судна и т.д. Так, были выбраны основные ресурсы, влияющие на судостроительную отрасль: железная руда, алюминий, цинк, медь, золото, мазут, дизельное топливо.

Для каждого ресурса выбираем статистику его стоимости за последние 15-30 лет и строим графики зависимости от времени. Для железной руды – это данные с октября 1988 года по октябрь 2018. Рассмотрим зависимость во времени на примере цены на железную руду.

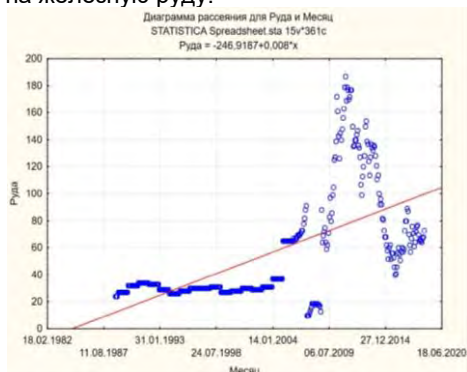


Рис. 2. График зависимости цены железной руды во времени, у.е./т

С помощью программного комплекса «STATISTICA»[7], осуществляется математический анализ изменения цены с течением времени: определение случайной составляющей, вычисление тренда (постоянной составляющей). В итоге подбирается линейная функция, характеризующая поведение исследуемой величины (рис. 2). Таким образом, стоимость железной руды во времени была выражена функцией:

$$fMATOIROR = -247 + 0.008 \cdot DATA \quad (7)$$

где DATA – дата, на которую рассчитывается цена ресурса. Для преобразования даты в число, используется следующий способ: за 1 принимается 01.01.1900, 2 – 02.01.1900, 3 – 03.01.1900 и т.д. Конечно, формула (7), имеет свой предел применимости, иначе стоимость просто стремится в бесконечность, что противоречит здравому смыслу. Именно поэтому для проведения корректных расчетов, формула (7) используется только для ближайших 25 лет, т.е. «максимальную» расчетную дату при данном способе следует принимать октябрь 2043 года. В дальнейшем, система может модернизироваться, пополняться новыми статистическими данными, зависимостями.

После построения графиков всех компонентов, стоит задача интегрировать их в расчет экономических показателей судна (раздел «экономика» математической модели). Очевидно, что, в первую очередь, цены на железную руду, влияют на стоимость судостроительного листового проката, а значит и на расходы по постройке корпуса судна. Согласно источнику [8] стоимость постройки корпуса судна рассчитывается:

$$CMATS = fMATOIROR \cdot (MKOR + + 0.95 \cdot MKOR^{0.75}); \quad (8)$$

где MKOR – масса корпуса судна, рассчитанная в разделе «нагрузка».

Мы получили формулу (8), способную оценить стоимость корпуса судна на расчетную дату. Подобным образом, зависимости цен ресурсов внедряются в остальные экономические составляющие – цена расходного топлива, стоимость работ по постройке судна, зарплата экипажа и другие статьи расхода. В итоге мы получаем критерий ZPR, с поправкой на планируемую дату закладки киля, что позволит оценить эффективность проектируемого судна, задолго до его воплощения в жизнь.

## 3. Результаты компьютерных экспериментов

Рассмотрим работу программного комплекса на примере проекта серии контейнерных судов, построенных на немецкой верфи Detlef Hegemann Rolandwerft GmbH & Co. KG в начале 21 века. Основные исходные данные приведены на рис. 5, пример проведенного расчета по разделу «Сопrotивление» отображены на рис. 7.

После проведения 44 тысяч циклов оптимизации (параметры оптимизации отображены на рис.6), программа определила 80 успешных вариантов. Расчет производился на предполагаемую дату закладки киля – 23.10.2029. Для анализа полученных данных построим график значений генерируемых

переменных в зависимости от номера успешного цикла оптимизации.

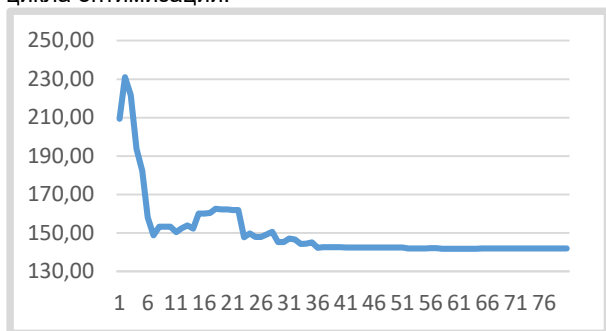


Рис. 3. Значение длины судна (м) по успешным циклам оптимизации

На рис. 3 приведено изменение длины судна по успешным циклам оптимизации. Как видно из графика, самые большие изменения по увеличению или уменьшению значения переменной происходят на первых 30-35 этапах. Одна из причин такого поведения функции значение величины RSL из формулы (3):

$$RSL = X^M \quad (9)$$

где X – случайное число из диапазона [1;-1], M – число-параметр, задаваемый пользователем программы «Архелон». В нашем случае:

Значения M

Значение параметра M	Количество циклов оптимизации
1	20000
3	12000
5	8000
7	4000

Как очевидно – чем меньше значение M, тем больше выражение RSL, а, следовательно, и больше диапазон «скачка» генерируемой переменной. Одна из главных особенностей программы «Архелон» – расчёт эффективности судна в ближайшей перспективе, т. е. его минимальной стоимости в сравнении с тысячами другими генерируемыми вариантами. Для анализа значения критерия на временном отрезке 1990-2040 годов проведем оптимизацию судна с интервалом в 1 год и построим соответствующий график (рис. 4) Из рис. 4.



Рис. 4. Значение критерия ZOPT (y.e. x 10^7)

Параметр	Обозн.	Ед.	Знач.	Параметр	Обозн.	Ед.	Знач.
Водоизмещение	V	м3	12153	Число ярусов палубных контейн.	NPALYA	шт	5
Длина	LPP	м	126.8	Длина дизельной ЭУ	LDIZ	м	8.2
Кол-во контейнеров по ширине судна	BKOMAX	TEU	6	Необходимая площадь МО	SMOMO	м2	80
Количество ярусов контейнеров в трюме	NNN	TEU	3	Численность экипажа	NEK	чел	15
Коэффициент общей полноты	DELTA	---	0.671	Высота пространства под трюмами	HDVD	м	2
Скорость	UO	узл	17	Ширина контейнера	BKON	м	2.44
Заданная контейне-сть	ZADKON	TEU	689	Высота контейнера	HKON	м	2.44
Чисто штабелей в корм. трюмах	NKOR SHT	TEU	0	Вес контейнера	PKON	т	9.5

Рис. 5 Исходные данные судна

Оптимизация

Ввод данных | Оптимизация | Результаты | Статистика вычислений | Расчеты

Параметр	Обозн.	Ед.	Знач.	Параметр	Обозн.	Ед.	Знач.
Число ограничений-неравенств	NOGNER	---	20	Число циклов M = 1	MKRAT [0]	---	20000
Минимальное знач. длины судна	LPPMIN	м	70	Число циклов M = 3	MKRAT [1]	---	12000
Максимальное знач. длины судна	LPPMAX	м	300	Число циклов M = 5	MKRAT [2]	---	8000
Минимальное знач. водоизмещ. судна	VMIN	м <sup>3</sup>	1000	Число циклов M = 7	MKRAT [3]	---	4000
Максимальное знач. водоизмещ. судна	VMAX	м <sup>3</sup>	100000				
Минимальное знач. коэф. полноты судна	DELTA MIN	---	0.550				
Максимальное знач. коэф. полноты судна	DELTA MAX	---	0.725				

Рис. 6 Параметры оптимизации судна

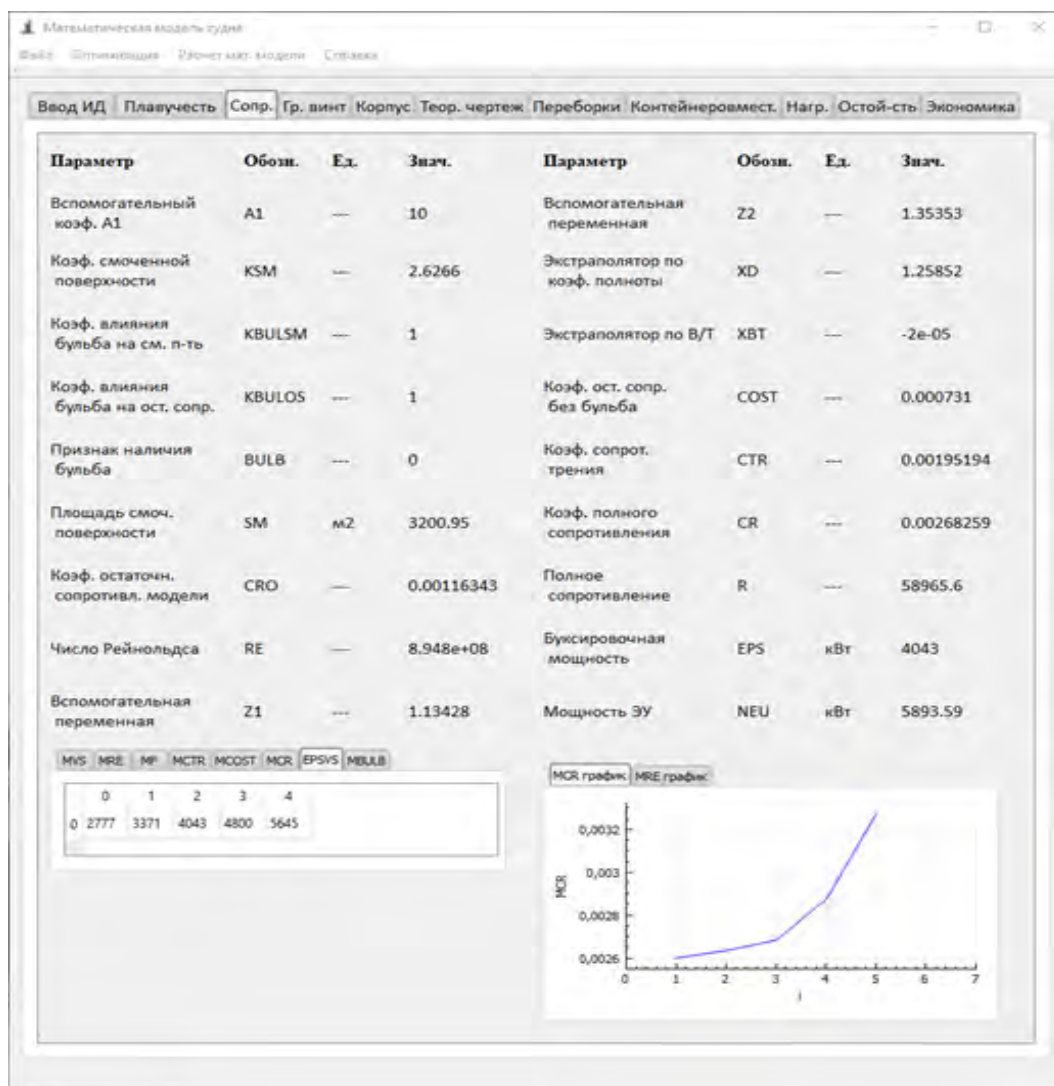


Рис. 7 Расчет раздела «Сопротивление»



Очевидно, что со временем цена постройки и эксплуатации судна линейно возрастает, и за 50 лет она увеличивается почти в 15 раз. Данный факт обуславливается ежегодным ростом цен на мировых рынках и, при одинаковой заданной контейнероёмкости судна, его стоимость неуклонно растёт. Как было сказано ранее, линейные графики имеют ограниченный диапазон применимости, т. к. стремятся в бесконечность. Именно поэтому точные данные по данной методике можно получить лишь на ближайшую среднесрочную перспективу -25 лет.

#### Заключение

В настоящей статье рассмотрен вопрос, выходящий за рамки изучения теории проектирования корабля. Экономика, статистика, прогнозирование, программирование – вот лишь часть из смежных дисциплин, без хотя бы общего ознакомления с которыми невозможно было бы решить поставленные задачи. Незаменимым

помощником в решении поставленной задачи служит программный комплекс «Архелон», комбинирующий в себе взаимодействие математической модели и алгоритма оптимизации методом случайного поиска.

Расчет стоимости постройки и последующей эксплуатации судна позволяет на самых ранних этапах проектирования оптимизировать техническую систему, отбросить неэффективные и дорогостоящие варианты, а главное – существенно повысить шансы воплощения проекта в жизнь. Среди недостатков описанного метода следует отметить невозможность прогнозирования резких скачков цен на мировые ресурсы (а значит и величины критерия). Однако, возможность адаптации математической модели под различные типы судов, охват параметров почти всех разделов теории корабля и возможность автоматизации процесса делают его одним из самых перспективных способов оптимизации параметров системы «судно» с учетом итогов проведенного научного предсказания.

#### Литература

1. Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов. Том 2., СПб, Моринтех, 2014, с. 541.
2. Гайкович А.И. Применение современных математических методов в проектировании судов. Ленинград, изд. ЛКИ, 1982, с.8
3. Холоша В.И. Проектирование и эксплуатация сухогрузных судов. Ленинград: Судостроение, 1984 г., с.11
4. Правила классификации и постройки морских судов, Часть IV, Российский Морской Регистр Судостроения, СПб, 2019 – с. 21
5. Гайкович А.И. Основы проектирования сложных технических систем – СПб: Моринтех, 2001 – с. 277.
6. В. Чуев, Ю.Б. Михайлов, Прогнозирование в военном деле. М., 1972 г., с. 12
7. <http://statsoft.ru/> официальный сайт программного обеспечения Statistica
8. Myung Roh, Kyu-Yeul Lee, Computational ship design, Seoul (Republic of Korea): Springer Nature, 2018, p. 300.

#### References

1. Gaykovich A.I. Teoriya proektirovaniya vodoizmeshchayushchikh korablye i sudov. Tom 2 [Design theory for water displacing ships and vessels] , SPb, Morintekh, 2014, s. 541.
2. Gaykovich A.I. Primenenie sovremennykh matematicheskikh metodov v proektirovanii sudov [Application of modern mathematical methods in ship design], Leningrad, izd. LKI, 1982, s.8
3. Kholosha V.I. Proektirovanie i ekspluatatsiya sukhogruznykh sudov [Design and service of dry cargo ships], Leningrad: Sudostroenie, 1984 g., s.11
4. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Chast' IV [Rules for the classification and construction of sea-going ships. Part IV], Rossiyskiy Morskoy Registr Sudokhodstva, SPb, 2019 – s. 21
5. Gaykovich A.I. Osnovy proektirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh system [The basics of complex technical systems design], SPb: Morintekh, 2001 – s. 277.
6. V. Chuev, Yu.B. Mikhaylov, Prognozirovanie v voennom dele [Forecasting in military science], M., 1972 g., s. 12
7. <http://statsoft.ru/> ofitsial'nyy sayt programmno obespecheniya Statistica [Official website of the software "Statistica"]
8. Myung Roh, Kyu-Yeul Lee, Computational ship design, Seoul (Republic of Korea): Springer Nature, 2018, p. 300.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Юрий Павлович Буров**, инженер-инспектор Новороссийского филиала ФАУ «Российский Морской Регистр Судостроения», Россия, 353900, Краснодарский край, г. Новороссийск, ул. Мира, д. 4, e-mail: burovyury@yandex.ru

**Yury P. Burov**, surveyor of Novorossiysk branch of FAI "Russian Maritime Register of Shipping", Mira , 4, Novorossiysk, Krasnodar region, 353900, Russian Federation , e-mail: burovyury@yandex.ru

## ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 629.12:624.04

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.005

### Устойчивость стабилизаторов глубоководных аппаратов

С.О. Барышников<sup>1</sup>, М.В. Сухотерин<sup>1</sup>, Т.П. Кныш<sup>1</sup>, Н.Ф. Пижурин<sup>1</sup><sup>1</sup>Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова

**Аннотация.** В данной работе исследуется устойчивость прямоугольной консольной панели как приближенной расчетной модели стабилизаторов глубоководных аппаратов. Вследствие высокого давления воды сжимающие усилия в плоскости стабилизатора, приложенные к свободным граням, могут быть значительными и приводить к потере устойчивости.

Целью настоящей работы является разработка эффективного метода численного моделирования устойчивости стабилизаторов принципиально новых судов и кораблей, в том числе из новых материалов. Задачей исследования является определение спектра критических сжимающих нагрузок, а также соответствующих форм закритического равновесия для этих элементов.

Краевая задача устойчивости прямоугольной консольной панели описывается дифференциальным уравнением четвертого порядка в частных производных по двум переменным для искомого функции прогибов и системой граничных условий, содержащих частные производные этой функции до третьего порядка включительно. В качестве параметра основное уравнение изгиба содержит интенсивность равномерно распределенного давления на свободные края панели. Функция прогибов выбирается в виде суммы двух гипербола-тригонометрических рядов по двум координатам и дополняется затем специальными компенсирующими членами. Проблема сводится к исследованию бесконечной однородной системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов рядов. Поиск критических нагрузок осуществляется перебором величины давления и анализом бесконечной системы. Получен спектр нескольких первых критических нагрузок, при которых появляется новая форма равновесия.

**Ключевые слова:** Стабилизаторы глубоководных аппаратов, устойчивость, консольные панели, критические нагрузки, формы равновесия.

### Buckling of stabilizers deep-sea vehicles

Sergey O. Baryshnikov<sup>1</sup>, Mikhail V. Sukhoterin<sup>1</sup>, Tatiana P. Knysheva<sup>1</sup>, Natalia F. Pizhurina<sup>1</sup><sup>1</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

**Abstract.** In this paper, we study the stability of a rectangular console panel as an approximate computational model of deep-sea vehicle stabilizers. Due to high water pressure, compressive forces in the stabilizer plane applied to free faces can be significant and lead to loss of stability.

The purpose of this work is to develop an effective method for numerical modeling of stability of stabilizers of fundamentally new vessels and ships, including those made of new materials. The aim of the study is to determine the spectrum of critical compressive loads, as well as the corresponding forms of supercritical equilibrium for these elements.

The boundary value problem of stability of a rectangular console panel is described by a fourth-order partial differential equation for two variables for the desired deflection function and a system of boundary conditions containing partial derivatives of this function up to and including the third order. As a parameter, the basic bending equation contains the intensity of evenly distributed pressure on the free edges of the panel. The deflection function is selected as the sum of two hyperbolic-trigonometric series over two coordinates and then supplemented with special compensating terms. The problem is reduced to the study of an infinite homogeneous system of linear algebraic equations with respect to unknown series coefficients. The search for critical loads is performed by searching the pressure value and analyzing the infinite system. The spectrum of the first few critical loads at which a new form of equilibrium appears is obtained.

**Keywords:** Stabilizers of deep-sea vehicles, stability, console panels, critical loads, forms of equilibrium.

### Введение

В глубоководных аппаратах консольные панели используются в качестве стабилизаторов. В горизонтальном положении на стабилизатор помимо выталкивающей силы действует приложенная к свободным граням распределенная сжимающая нагрузка в плоскости панели, которой обычно пренебрегают при небольших глубинах погружения [1]. На больших глубинах сжимающие усилия могут быть значительными и вызывать потерю устойчивости стабилизатора. Если материал консольной панели обладает высокой упругостью, то она может быстро пройти критическое состояние,

сопровождаясь резким ростом прогибов, и перейти в закритическое равновесное состояние. С математической точки зрения задача устойчивости есть задача о собственных значениях параметра нагрузки, которая имеет бесчисленное множество решений. На практике ограничиваются поиском только первой критической нагрузки, которую считают разрушающей для панелей из обычных материалов. Однако для панелей из высокоупругих материалов практический интерес вызывают и последующие одна-две критические нагрузки и соответствующие формы потери устойчивости.

Проблема устойчивости консольных панелей (пластин) в виду сложности краевой задачи является

наименее изученной. Немногими работами, в которых получены численные результаты для критических нагрузок, являются работы [2-6], в которых использовался приближенный энергетический метод. Критерием точности вычислений является проверка выполнения всех граничных условий: невязки должны быть равны нулю или весьма малы. Однако именно эта проверка для большинства численных методов сопряжена с большими трудностями, так эти методы работают с массивами чисел, а не с аналитическими выражениями. Примерами таких методов являются метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечных разностей (МКР).

В работах [2], [3] рассматривались различные виды сжимающей нагрузки на контуре пластины. В первой из них распределенная сжимающая нагрузка приложена только к грани, параллельной заделке, а во второй сжимались лишь грани, перпендикулярные заделке. Вариационным методом найдены только первые критические нагрузки. В работе [4] сжимающая нагрузка приложена только к одной грани, перпендикулярной заделке. Для поиска решения использовалось условие минимума полной энергии пластины. Аналогичная задача решалась и в работе [5], в которой аппроксимирующая функция выбиралась в виде полинома. Случай сжимающей нагрузки по всем граням не рассматривался.

В работе [6] с помощью МКЭ найдены первые критические нагрузки для различных случаев приложения сосредоточенных сжимающих усилий.

Устойчивость консольной косоугольной неоднородной пластины в сверхзвуковом потоке газа исследовалась в работе [7], где критические числа находились МКЭ с использованием вариационного принципа Гамильтона.

В настоящей работе найдено точное решение задачи с помощью гиперболо-тригонометрических рядов. Проблема свелась к решению бесконечной однородной системы линейных алгебраических уравнений для коэффициентов этих рядов. Нетривиальные значения коэффициентов можно получить, приравняв нулю определитель этой системы. Однако составление определителя и решение соответствующего уравнения, дающее спектр критических нагрузок, является весьма трудоемким процессом. Здесь предложен метод перебора параметра нагрузки в сочетании с итерационным методом определения коэффициентов. Для данной нагрузки начальные значения коэффициентов первого ряда задаются произвольно в виде убывающей последовательности. Эти значения и значения остальных коэффициентов уточняются в ходе итерационного процесса, который при данном значении нагрузки будет либо сходиться к тривиальным решениям для коэффициентов (устойчивое равновесие), либо к нетривиальным решениям (новая форма равновесия), либо процесс будет расходиться, определяя для сжимающих нагрузок интервал неустойчивости.

### 1. Методы и материалы

Рассмотрим прямоугольную консольную пластину (панель), нагруженную по свободным граням равномерными сжимающими усилиями  $T_x$ ,  $T_y$  (рис.1).

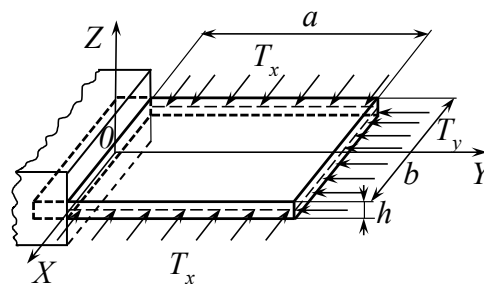


Рис. 1. Консольная пластина под действием равномерного давления на ее грани

Дифференциальное уравнение изгиба пластины имеет вид [8]

$$D \nabla^2 \nabla^2 W + T_x \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} + T_y \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} = 0, \quad (1)$$

где  $W$  – прогиб срединной поверхности пластины,  $D = Eh^3 / [12(1-\nu^2)]$  – цилиндрическая жесткость пластины,  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $\nabla^2$  – двумерный оператор Лапласа.

Перейдем к безразмерным координатам  $x = X/b$ ,  $y = Y/b$ . Тогда уравнение (1) запишется так:

$$\nabla^2 \nabla^2 w + T_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0, \quad (2)$$

где  $w = W/b$  – относительный прогиб,  $T_x = T_x b^2 / D$ ,  $T_y = T_y b^2 / D$  – интенсивность относительных сжимающих усилий. Относительные размеры пластины будут такими:  $-\gamma/2 \leq x \leq \gamma/2$ ,  $0 \leq y \leq 1$ , где  $\gamma = a/b$ .

Граничные условия [8]:

$$w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial y} = 0, \quad \text{на грани } y = 0 \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \\ \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} = 0 \end{cases}, \text{ на грани } y = 0 \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \\ \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} = 0 \end{cases}, \text{ на гранях } x = \pm \gamma/2 \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = 0 \quad \text{в точках } (\pm \gamma/2, 1) \quad (6)$$

Здесь условия (3) выражают отсутствие прогибов и углов поворота заделанной грани; условия (4, 5) – отсутствие на свободных гранях изгибающих моментов и перерезывающих сил; последнее условие (6) записано для крутящих моментов в угловых точках свободного контура.

Задача устойчивости ставится так: найти функцию прогибов  $w(x, y)$ , удовлетворяющую уравнениям (2–6), а также спектр критических усилий  $T_x$ ,  $T_y$ , при которых пластина теряет устойчивость и приобретает затем новые формы равновесия. Отметим, что эти формы могут быть как симметричными относительно оси  $Oy$ , так и антисимметричными

В виду симметрии пластины, нагрузки и граничных условий относительно оси  $Oy$  решение будем разыскивать сначала в симметричной форме относительно этой оси, тем более, что первая форма

закритического равновесия должна соответствовать форме изогнутой поверхности пластины под действием равномерной поперечной нагрузки.

**1.1. Симметричное решение**

Симметричное решение будем разыскивать в виде суммы двух гиперголо-тригонометрических рядов

$$w(x, y) = w_1(x, y) + w_2(x, y), \quad (7)$$

$$w_1(x, y) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} A_k \cosh \alpha_k x \cdot \sin \lambda_k y. \quad (8)$$

$$w_2(x, y) = \sum_{s=1}^{\infty} (-1)^s \left[ \begin{matrix} C_s \sinh \xi_s (y-1) \\ + D_s \cosh \xi_s (y-1) \end{matrix} \right] \cos \mu_s x. \quad (9)$$

В этом выражении  $A_k, C_s, D_s, \alpha_k, \xi_s$  – неопределенные коэффициенты;  $\lambda_k = k\pi/2$ ;  $\mu_s = 2\pi s/\gamma$ ,

Потребуем, чтобы каждая из этих функций удовлетворяла основному дифференциальному уравнению (2). Тогда для коэффициентов  $\alpha_k, \xi_s$  получим биквадратные уравнения

$$\alpha_k^4 - 2\alpha_k^2 \lambda_k^2 + \lambda_k^4 + T_x \alpha_k^2 - T_y \lambda_k^2 = 0, \quad (10)$$

$$\xi_s^4 - 2\xi_s^2 \mu_s^2 + \mu_s^4 - T_x \mu_s^2 + T_y \xi_s^2 = 0 \quad (11)$$

которые имеют по четыре корня:

$$\alpha_k = \pm \sqrt{0.5(2\lambda_k^2 - T_x \pm \sqrt{4\lambda_k^2(T_y - T_x) + T_x^2})} \quad (12)$$

$$\xi_s = \pm \sqrt{0.5(2\mu_s^2 - T_y \pm \sqrt{4\mu_s^2(T_x - T_y) + T_y^2})} \quad (13)$$

В силу четности и нечетности гиперболических функций достаточно взять по паре корней, которые мы обозначим

$$\alpha_k, \beta_k = \sqrt{0.5(2\lambda_k^2 - T_x \pm \sqrt{4\lambda_k^2(T_y - T_x) + T_x^2})} \quad (14)$$

$$\xi_s, \eta_s = \sqrt{0.5(2\mu_s^2 - T_y \pm \sqrt{4\mu_s^2(T_x - T_y) + T_y^2})}. \quad (15)$$

С учетом этого функции (8, 9) примут вид

$$w_1(x, y) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \left[ \begin{matrix} A_k \cosh \alpha_k x \\ + B_k \cosh \beta_k x \end{matrix} \right] \sin \lambda_k y \quad (16)$$

$$w_2(x, y) = \sum_{s=1}^{\infty} (-1)^s \left[ \begin{matrix} C_s \sinh \xi_s (y-1) \\ + D_s \sinh \eta_s (y-1) \\ + E_s \cosh \xi_s (y-1) \\ + F_s \cosh \eta_s (y-1) \end{matrix} \right] \cos \mu_s x, \quad (17)$$

где  $A_k, B_k, C_s, D_s, E_s, F_s$  – неопределенные коэффициенты. Нетрудно проверить, что обе эти функции "автоматически" удовлетворяют граничному условию (6). Потребуем, чтобы они удовлетворяли граничным условиям (3-5). Тогда получим систему уравнений

$$C_s \sinh \xi_s + D_s \sinh \eta_s - E_s \cosh \xi_s - F_s \cosh \eta_s = 0, \quad (18)$$

$$\sum_{s=1}^{\infty} \left( \begin{matrix} C_s \xi_s \cosh \xi_s + D_s \eta_s \cosh \eta_s \\ - E_s \xi_s \sinh \xi_s - F_s \eta_s \sinh \eta_s \end{matrix} \right) \cos \mu_s x$$

$$+ \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \lambda_k [A_k \cosh \alpha_k x + B_k \cosh \beta_k x] = 0, \quad (19)$$

$$\sum_{s=1}^{\infty} (-1)^s \left[ E_s (\xi_s^2 - \nu \mu_s^2) + F_s (\eta_s^2 - \nu \mu_s^2) \right] \cos \mu_s x - \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^k \left[ \begin{matrix} A_k (\nu \alpha_k^2 - \lambda_k^2) \cosh \alpha_k x \\ + B_k (\nu \beta_k^2 - \lambda_k^2) \cosh \beta_k x \end{matrix} \right] = 0, \quad (20)$$

$$C_s \xi_s [\xi_s^2 - (2-\nu) \mu_s^2] + D_s \eta_s [\eta_s^2 - (2-\nu) \mu_s^2] = 0, \quad (21)$$

$$\sum_{s=1}^{\infty} \left[ \begin{matrix} C_s (\mu_s^2 - \nu \xi_s^2) \sinh \xi_s (y-1) \\ + D_s (\mu_s^2 - \nu \eta_s^2) \sinh \eta_s (y-1) \\ + E_s (\mu_s^2 - \nu \xi_s^2) \cosh \xi_s (y-1) \\ + F_s (\mu_s^2 - \nu \eta_s^2) \cosh \eta_s (y-1) \end{matrix} \right] - \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \left[ \begin{matrix} A_k (\alpha_k^2 - \nu \lambda_k^2) \cosh \tilde{\alpha}_k \\ + B_k (\beta_k^2 - \nu \lambda_k^2) \cosh \tilde{\beta}_k \end{matrix} \right] \sin \lambda_k y = 0, \quad (22)$$

$$A_k \alpha_k [\alpha_k^2 - (2-\nu) \lambda_k^2] \sinh \tilde{\alpha}_k + B_k \beta_k [\beta_k^2 - (2-\nu) \lambda_k^2] \sinh \tilde{\beta}_k = 0 \quad (23)$$

Здесь  $\tilde{\alpha}_k = \alpha_k \gamma / 2$ ,  $\tilde{\beta}_k = \beta_k \gamma / 2$ ,  $\tilde{k} = (k+1) / 2$ .

В уравнениях (19) и (20) восторых рядах разложим гиперболические функции в ряды Фурье по  $\cos \mu_s x$

$$\cosh \alpha_k x = \sinh \tilde{\alpha}_k \left[ \frac{1}{\tilde{\alpha}_k} + \frac{4\alpha_k}{\gamma} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{(-1)^s}{\alpha_k^2 + \mu_s^2} \cos \mu_s x \right]$$

(разложение  $\cosh \beta_k x$  получается заменой  $\alpha_k$  на  $\beta_k$ ) и переставим в уравнениях знаки суммирования:

$$\sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \lambda_k [A_k \cosh \alpha_k x + B_k \cosh \beta_k x] = \mathcal{G}_0 + \sum_{s=1}^{\infty} (-1)^s \mathcal{G}_s \cos \mu_s x, \quad (24)$$

$$\sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^k \left[ \begin{matrix} A_k (\nu \alpha_k^2 - \lambda_k^2) \cosh \alpha_k x \\ + B_k (\nu \beta_k^2 - \lambda_k^2) \cosh \beta_k x \end{matrix} \right] = m_0 + \sum_{s=1}^{\infty} (-1)^s m_s \cos \mu_s x, \quad (25)$$

где

$$\mathcal{G}_0 = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \lambda_k \left( A_k \frac{\sinh \tilde{\alpha}_k}{\tilde{\alpha}_k} + B_k \frac{\sinh \tilde{\beta}_k}{\tilde{\beta}_k} \right), \quad (26)$$

$$\mathcal{G}_s = \frac{4}{\gamma} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \lambda_k \left( A_k \frac{\alpha_k \sinh \tilde{\alpha}_k}{\alpha_k^2 + \mu_s^2} + B_k \frac{\beta_k \sinh \tilde{\beta}_k}{\beta_k^2 + \mu_s^2} \right), \quad (27)$$



$$m_0 = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^k \left[ \begin{aligned} &A_k (v\alpha_k^2 - \lambda_k^2) \frac{\sinh \tilde{\alpha}_k}{\tilde{\alpha}_k} \\ &+ B_k (v\beta_k^2 - \lambda_k^2) \frac{\sinh \tilde{\beta}_k}{\tilde{\beta}_k} \end{aligned} \right], \quad (28)$$

$$m_s = \frac{4}{\gamma} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^k \left[ \begin{aligned} &A_k (v\alpha_k^2 - \lambda_k^2) \frac{\alpha_k \sinh \tilde{\alpha}_k}{\alpha_k^2 + \mu_s^2} \\ &+ B_k (v\beta_k^2 - \lambda_k^2) \frac{\beta_k \sinh \tilde{\beta}_k}{\beta_k^2 + \mu_s^2} \end{aligned} \right] \quad (29)$$

В уравнении (22) в первом ряду разложим гиперболические функции в ряды Фурье по  $\sin \lambda_k y$

$$\sinh \xi_s(y-1) = -2 \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^k \xi_s + \lambda_k \sinh \xi_s}{\lambda_k^2 + \xi_s^2} \sin \lambda_k y$$

$$\cosh \xi_s(y-1) = 2 \cosh \xi_s \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\lambda_k}{\lambda_k^2 + \xi_s^2} \sin \lambda_k y$$

(для остальных двух функций надо заменить  $\xi_s$  на  $\eta_s$ ) и переставим в уравнении знаки суммирования:

$$\sum_{s=1}^{\infty} \left[ \begin{aligned} &C_s (\mu_s^2 - v\xi_s^2) \sinh \xi_s(y-1) \\ &+ D_s (\mu_s^2 - v\eta_s^2) \sinh \eta_s(y-1) \\ &+ E_s (\mu_s^2 - v\xi_s^2) \cosh \xi_s(y-1) \\ &+ F_s (\mu_s^2 - v\eta_s^2) \cosh \eta_s(y-1) \end{aligned} \right] = - \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} b_k \sin \lambda_k y, \quad (30)$$

где

$$b_k = 2 \sum_{s=1}^{\infty} \left[ \begin{aligned} &C_s (\mu_s^2 - v\xi_s^2) \frac{(-1)^k \xi_s + \lambda_k \sinh \xi_s}{\lambda_k^2 + \xi_s^2} \\ &+ D_s (\mu_s^2 - v\eta_s^2) \frac{(-1)^k \eta_s + \lambda_k \sinh \eta_s}{\lambda_k^2 + \eta_s^2} \\ &- E_s (\mu_s^2 - v\xi_s^2) \frac{\lambda_k \cosh \xi_s}{\lambda_k^2 + \xi_s^2} \\ &- F_s (\mu_s^2 - v\eta_s^2) \frac{\lambda_k \cosh \eta_s}{\lambda_k^2 + \eta_s^2} \end{aligned} \right]. \quad (31)$$

В уравнениях (19, 20) появились свободные члены  $\vartheta_0$  и  $m_0$ , которые мы компенсируем позже.

Тогда система уравнений (18-23) после освобождения от внешних знаков суммирования примет вид

$$C_s \sinh \xi_s + D_s \sinh \eta_s - E_s \cosh \xi_s - F_s \cosh \eta_s = 0, \quad (32)$$

$$\begin{aligned} &C_s \xi_s \cosh \xi_s + D_s \eta_s \cosh \eta_s \\ &- E_s \xi_s \sinh \xi_s - F_s \eta_s \sinh \eta_s = -\vartheta_s \end{aligned} \quad (33)$$

$$E_s (\xi_s^2 - v\mu_s^2) + F_s (\eta_s^2 - v\mu_s^2) = m_s \quad (34)$$

$$C_s \xi_s [\xi_s^2 - (2-v)\mu_s^2] + D_s \eta_s [\eta_s^2 - (2-v)\mu_s^2] = 0 \quad (35)$$

$$A_k (\alpha_k^2 - v\lambda_k^2) \cosh \tilde{\alpha}_k + B_k (\beta_k^2 - v\lambda_k^2) \cosh \tilde{\beta}_k = -b_k \quad (36)$$

$$\begin{aligned} &A_k \alpha_k [\alpha_k^2 - (2-v)\lambda_k^2] \sinh \tilde{\alpha}_k \\ &+ B_k \beta_k [\beta_k^2 - (2-v)\lambda_k^2] \sinh \tilde{\beta}_k = 0 \end{aligned} \quad (37)$$

Теперь, для того, чтобы компенсировать свободные члены разложения по косинусам и при этом не нарушить основное дифференциальное уравнение (2), и все граничные условия (3-6), введем дополнительную функцию прогибов

$$w_0(y) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} g_k \sin \lambda_k y + \frac{1}{2} m_0^* y^2 - \vartheta_0^* y \quad (38)$$

Подчиняя ее уравнению (2) и всем граничным условиям, получим

$$g_k = -\frac{2m_0^* T_y}{\lambda_k^3 (\lambda_k^2 - T_y)}. \quad (39)$$

$$m_0^* = \frac{m_0}{1 - 2T_y \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^k}{\lambda_k (\lambda_k^2 - T_y)}} \quad (40)$$

$$\vartheta_0^* = \vartheta_0 - 2m_0^* T_y \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{\lambda_k^2 (\lambda_k^2 - T_y)}. \quad (41)$$

Причем в уравнении (36) к  $b_k$  добавится

$$b_{k0}^* = 2m_0^* v \left[ \frac{1}{\lambda_k} + \frac{T_y}{\lambda_k (\lambda_k^2 - T_y)} \right] \quad (42)$$

т.е. в правой части (36) будет стоять

$$\tilde{b}_k = b_k + b_{k0}^*. \quad (43)$$

Система (32-37) является бесконечной однородной системой линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов  $A_k, B_k, C_s, D_s, E_s, F_s$ . Она всегда имеет тривиальное решение. Нетривиальное решение получим, если определитель системы будет равен нулю при некоторых (критических) значениях параметров нагрузки  $T_x$  и  $T_y$ . При этих значениях пластина приобретет новую форму равновесия. Раскрывать определитель и находить его корни – весьма сложная задача, поэтому здесь предложен другой путь.

Начальные значения коэффициентов  $b_k$  в уравнении (36) задаются произвольно в виде убывающей последовательности (в данном случае  $1/\lambda_k^3$ ), затем решается подсистема уравнений (36)-(37) при произвольно выбранных значениях сжимающей нагрузки  $T_x$  и  $T_y$ . Найденные начальные коэффициенты  $A_{k0}, B_{k0}$  подставляются в выражения (26) - (29) для вычисления  $\vartheta_0, \vartheta_s, m_0, m_s$ . Потом решается подсистема (32) - (35), из которой находятся коэффициенты  $C_{s0}, D_{s0}, E_{s0}, F_{s0}$ , используемые затем для определения коэффициентов  $\tilde{b}_k$  (43) новой итерации с учетом формул (31, 40, 42). И далее идет итерационный процесс уточнения коэффициентов рядов. Если, начиная с некоторой итерации, соответствующие коэффициенты рядов будут практически совпадать (до 4-5 значащих цифр), то это значит, что найдено нетривиальное решение однородной системы (32)-(37), т.е. ее определитель будет равен нулю. А нагрузка, при которой это было достигнуто, будет определять новую форму равновесия (минимум потенциальной энергии пластины). Эту нагрузку и следует считать критической. Значения нагрузки,

при которых итерационный процесс приводит к тривиальному решению системы (32) - (37), будут определять зону устойчивого равновесия. Те значения нагрузок, при которых коэффициенты рядов, а, следовательно, и прогибы, будут стремиться к бесконечности, определяют зону неустойчивого состояния.

**1.2. Антисимметричное решение**

Это решение также будем разыскивать в виде суммы двух гиперголо-тригонометрических рядов.

$$w(x, y) = w_1(x, y) + w_2(x, y) \quad (44)$$

$$w_1(x, y) = \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \left[ \frac{A_k \sinh \alpha_k x}{+B_k \sinh \beta_k x} \right] \sin \lambda_k y \quad (45)$$

$$w_2(x, y) = \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^s \left[ \begin{array}{l} C_s \sinh \xi_s (y-1) \\ +D_s \sinh \eta_s (y-1) \\ +E_s \cosh \xi_s (y-1) \\ +F_s \cosh \eta_s (y-1) \end{array} \right] \sin \mu_s x \quad (46)$$

В этих выражениях  $A_k, B_k, C_s, D_s, E_s, F_s$  – новые неопределенные коэффициенты;  $\xi = (s+1)/2$ , другое и значение  $\mu_s = \pi s/\gamma$ . Коэффициенты  $\lambda_k, \alpha_k, \beta_k, \xi_s, \eta_s$  сохранили прежние значения.

В системе уравнений (32)-(37) изменятся последние два уравнения (поменяются синусы с косинусами):

$$A_k (\alpha_k^2 - \nu \lambda_k^2) \sinh \tilde{\alpha}_k + B_k (\beta_k^2 - \nu \lambda_k^2) \sinh \tilde{\beta}_k = -b_k \quad (47)$$

$$A_k \alpha_k [\alpha_k^2 - (2-\nu) \lambda_k^2] \cosh \tilde{\alpha}_k + B_k \beta_k [\beta_k^2 - (2-\nu) \lambda_k^2] \cosh \tilde{\beta}_k = 0 \quad (48)$$

Заметим, что  $b_k$  остается прежним. Остальные правые части будут такими

$$g_s = -\frac{4}{\gamma} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \lambda_k \left( A_k \frac{\alpha_k \cosh \tilde{\alpha}_k}{\alpha_k^2 + \mu_s^2} + B_k \frac{\beta_k \cosh \tilde{\beta}_k}{\beta_k^2 + \mu_s^2} \right) \quad (49)$$

$$m_s = -\frac{4}{\gamma} \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} (-1)^k \left[ \begin{array}{l} A_k (\nu \alpha_k^2 - \lambda_k^2) \frac{\alpha_k \cosh \tilde{\alpha}_k}{\alpha_k^2 + \mu_s^2} \\ +B_k (\nu \beta_k^2 - \lambda_k^2) \frac{\beta_k \cosh \tilde{\beta}_k}{\beta_k^2 + \mu_s^2} \end{array} \right] \quad (50)$$

Здесь использовалось разложение

$$\sinh \alpha_k x = -\frac{4}{\gamma} \alpha_k \cosh \frac{\alpha_k y}{2} \sum_{s=1,3,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^s}{\alpha_k^2 + \mu_s^2} \sin \mu_s x$$

Разложение  $\sinh \beta_k x$  получается заменой  $\alpha_k$  на  $\beta_k$ .

**2. Результаты**

Программа итерационного процесса определения коэффициентов рядов для функции прогибов прямоугольной консольной пластины была составлена в системе аналитических вычислений Maple. Коэффициенты выводились на печать на каждой итерации, что позволяло контролировать процесс и определить его сходимости или расходимость. Программой предусматривалось построение 3D графика изогнутой поверхности пластины. В рядах удерживалось 29-35 членов. Большее число членов не влияло заметно на точность вычислений, однако требовало увеличения количества значащих цифр при вычислениях (более

300). Иначе имело место "запирание" вычислительного процесса, т.е. все значения резко устремлялись в бесконечность. Число итераций – 20-50. В некоторых случаях для уточнения поведения коэффициентов число итераций увеличивалось до 120. Во всех расчетах коэффициент Пуассона  $\nu = 0.3$ . Так как на глубине интенсивность сжимающих усилий одинакова на всех гранях панели, то принято  $T_x = T_y = T$ . Параметры вычислительного процесса:  $\gamma = a/b$ ;  $T$ , число членов в рядах  $N$ , число итераций  $N_c$ .

Для симметричного решения вычисления для прямоугольной консольной пластины с отношением сторон  $\gamma = 1/2$  показали, что на интервале сжимающей нагрузки  $0 < T < \pi^2/4 \approx 2.4674$  итерационный процесс сходил к тривиальным решениям системы (32)-(37). Это означает, что пластина в этом интервале нагрузок устойчива. Значение  $T = 2.4674$ , при котором коэффициенты соседних итераций (начиная с некоторой) отличались только знаками, следует считать особым значением. Граничные условия по углам поворота заделки не выполнялись; форма изогнутой поверхности для двух соседних итераций менялась на противоположную. Считаем, что это значение является критическим для фиктивной пластины двойной длины по оси  $Oy$ , свободно опертой по краям  $y = 1$  и  $y = 2$ , так как в решении использовались функции  $\sin \lambda_k y$ .

На интервале  $2.4674 < T < 4.094$  вычислительный процесс был расходящимся: коэффициенты рядов неограниченно росли. Этот интервал является зоной неустойчивого состояния пластины. Здесь в дальнейшем следует решать задачу в нелинейной постановке. На конце интервала при  $T_{CR1} = 4.094$  имели место нетривиальные решения указанной системы: начиная с некоторой итерации соответствующие коэффициенты практически не отличались друг от друга. Пластина приобрела новую форму равновесия, соответствующую минимуму потенциальной энергии пластины (рис. 2). Нагрузка  $T_{CR1}$  является первой критической нагрузкой.

В диапазоне нагрузок  $4.094 < T < 9\pi^2/4 \approx 22.2066$  итерационный процесс опять сходил к тривиальному решению, т.е. здесь пластина была устойчивой. Значение  $T = 22.2066$ , при котором коэффициенты соседних итераций (начиная с некоторой) отличались только знаками, также следует считать особым значением. Диапазон  $22.2066 < T < 30.065$  – зона неустойчивого состояния (расходящийся итерационный процесс). При значении  $T_{CR2} = 30.065$  пластина приняла вторую форму равновесия (рис. 3). И далее процесс поиска критических нагрузок и новых форм равновесия можно продолжить.

Для квадратной пластины первый интервал устойчивого состояния  $0 < T < \pi^2/4 \approx 2.4674$ . Особое значение  $T = \pi^2/4 \approx 2.4674$ . Интервал  $2.467 < T < 3.848$  – первая зона неустойчивости.  $T_{CR1} = 3.848$  – первая критическая нагрузка (соответствующая форма представлена на рис. 4). Интервал  $3.848 < T < 9\pi^2/4 \approx 22.2066$  – зона устойчивости.  $T = 22.2066$  – особое значение. Интервал  $22.2066 < T < 26.099$  – зона неустойчивости.  $T_{CR2} = 26.099$  – вторая критическая нагрузка (соответствующая форма равновесия представлена на рис. 5).

Для прямоугольной пластины с отношением сторон  $\gamma = 2$  первый интервал устойчивого состояния  $0 < T < \pi^2/4 \approx 2.4674$ . Особое значение  $T = \pi^2/4 \approx 2.4674$ . Интервал  $2.4674 < T < 3.425$  – первая зона неустойчивости.  $T_{CR1} = 3.425$  – первая критическая нагрузка. Соответствующая форма равновесия представлена на рис. 6. Интервал  $3.425 < T < 5\pi^2/4 \approx 12.337$  зона устойчивости. Особое значение:  $T = 12.337$ . Интервал  $12.337 < T < 26.25$  – зона неустойчивости.  $T = 26.25$  – особое значение. Интервал  $26.25 < T < 13\pi^2/4 \approx 32.076$  – зона устойчивого состояния.  $T = 32.076$  – особое значение. Интервал  $32.076 < T < 50.116$  – зона неустойчивого состояния. Заметим, что при значении 50.116 итерационный процесс характерен тем, что коэффициенты с ростом итераций ни к какому пределу не стремятся. Соответствующие значения коэффициентов не выходят из определенного интервала, медленно меняясь.  $50.116 < T < 25\pi^2/4 \approx 61.685$  – зона устойчивости.  $T = 61.685$  – особое значение. Интервал  $61.685 < T < 88.01$  – зона неустойчивого состояния.  $T_{CR2} = 88.01$  – второе критическое усилие. Соответствующая форма равновесия представлена на рис. 7.

Большая разница между первым и вторым критическими усилиями потребовала более тщательного исследования изменения нагрузки, однако промежуточная критическая нагрузка не была обнаружена.

Для антисимметричного решения первая критическая нагрузка для пластины с отношением сторон  $\gamma = 1/2$  составила 227.69. Для квадратной пластины – 59.955. Для пластины с отношением сторон  $\gamma = 2$  она была равна 71.535. Соответствующие формы равновесия приведены на рис. 8-10.

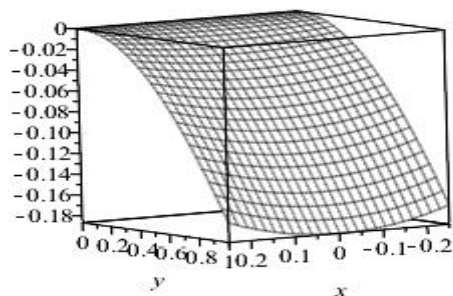


Рис.2. Первая форма равновесия прямоугольной пластины  $\gamma = 1/2$  при  $T_{CR1} = 4.094 D/b^2$

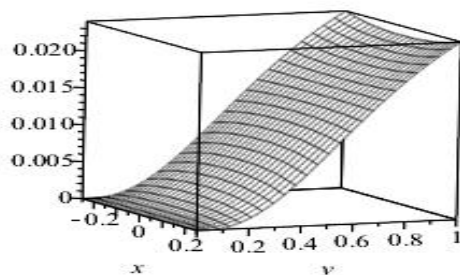


Рис.3. Вторая форма равновесия прямоугольной пластины  $\gamma = 1/2$  при  $T_{CR2} = 30.065 D/b^2$

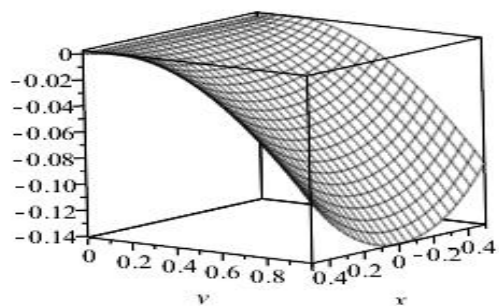


Рис.4. Первая форма равновесия квадратной пластины при  $T_{CR1} = 3.848 D/b^2$

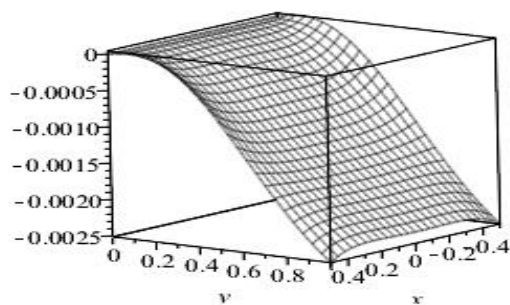


Рис.5. Вторая форма равновесия квадратной пластины при  $T_{CR2} = 26.099 D/b^2$

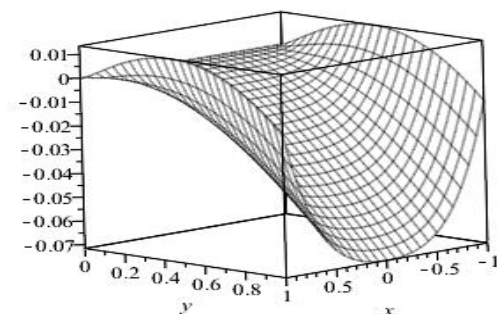


Рис.6. Первая форма равновесия прямоугольной пластины  $\gamma = 2$  при  $T_{CR1} = 3.425 D/b^2$

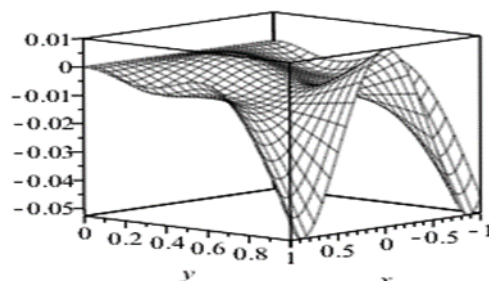


Рис.7. Вторая форма равновесия прямоугольной пластины  $\gamma = 2$  при  $T_{CR2} = 88.01 D/b^2$



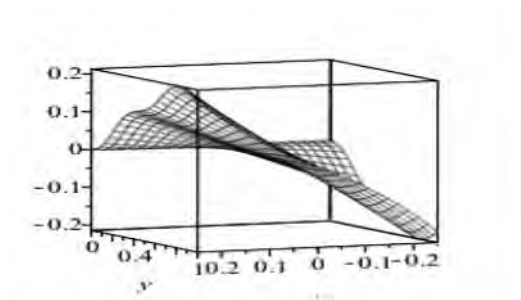


Рис.8 Первая антисимметричная форма равновесия прямоугольной пластины  $\gamma = 1/2$  при  $T_{CR3} = 227.69 D/b^2$

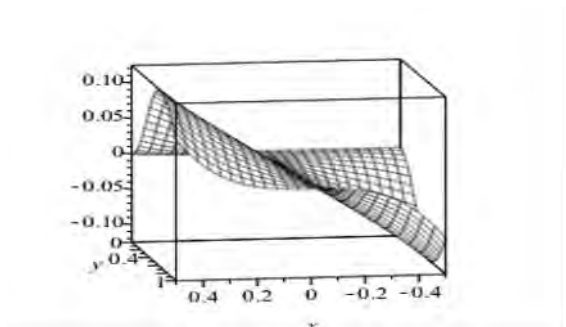


Рис.9. Первая антисимметричная форма равновесия квадратной пластины при  $T_{CR3} = 59.955 D/b^2$

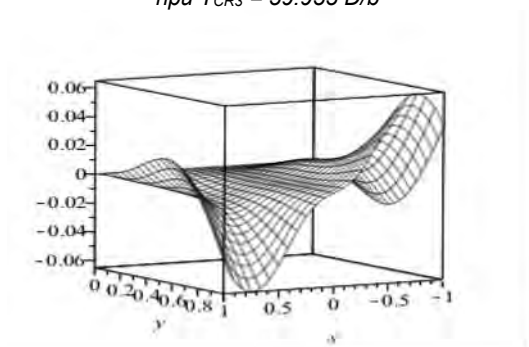


Рис.10. Первая антисимметричная форма равновесия прямоугольной пластины  $\gamma = 2$  при  $T_{CR3} = 71.535 D/b^2$

### 3. Обсуждение

Предлагаемый метод решения задачи устойчивости прямоугольной консольной панели как расчетной схемы стабилизатора глубоководного аппарата позволяет с высокой точностью определить несущую способность этого элемента на большой глубине.

В работе [2] определялась первая критическая нагрузка для квадратной консольной пластины, когда равномерное давление приложено лишь к свободной стороне, параллельной заделке. Это значение  $p_{кр} = 2.4571D/a^2$  было получено энергетическим методом из условия равенства нулю определителя второго порядка относительно сжимающего усилия  $p$ . Для сравнения методов в настоящей работе аналогичные вычисления показали  $p_{кр} = 2.1054D/a^2$ . Эти значения сопоставимы, однако энергетические методы дают, как правило, завышенные результаты, что имеет место и здесь.

В работе [3] того же автора получено первое критическое значение для квадратной пластины при равномерной нагрузке, приложенной к боковым свободным граням  $p_{кр} = 141.41587D/a^2$ . В нашей работе для этого случая получены первые три критические нагрузки  $43.714D/a^2$ ,  $45.41054D/a^2$ ,  $136.01D/a^2$  и соответствующие формы, т.е. в работе [3] были "пропущены" первые два критические значения.

### Заключение

Полученные результаты могут найти применение в проектно-конструкторских организациях для расчета на устойчивость внешних консольных элементов (стабилизаторов) батискафов и других глубоководных аппаратов. Знание критических нагрузок позволит избежать разрушения этих элементов. С помощью разработанного метода и вычислительного алгоритма можно находить критические и равновесные нагрузки для панелей с любым отношением сторон. Решение задачи в безразмерном виде позволяет определить критические нагрузки тонких панелей различной толщины, модуля упругости и коэффициента Пуассона. Найденный спектр критических нагрузок будет востребован при использовании в конструкциях глубоководных аппаратов новых материалов, обладающих высокой упругостью.

### Литература

1. Шапошников В.М. Композитные конструкции наружного корпуса и элементов оперения подводной лодки / В.М. Шапошников, Б.А. Ярцев // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2017. – № 1(379). – С. 36-44.
2. Xiang-sheng C. The bending stability and vibration of cantilever rectangular plates / C. Xiang-sheng // Applied Mathematics and Mechanics (English Edition). – 1987. – V. 8(7). – Pp. 673–683 (China)
3. Xiang-sheng C. On buckling of cantilever rectangular plates under symmetrical edge loading / C. Xiang-sheng // Applied Mathematics and Mechanics (English Edition). – 1990. – V. 11(4). – Pp. 377–383 (China)
4. Xiang-sheng C. On several problems for lateral instability of cantilever plates / C. Xiang-sheng // Applied Mathematics and Mechanics (English Edition). – 1988. – V. 9(8). – pp. 787-792
5. Yi-wu Yu. A polynomial method for solving the problems for lateral instability of cantilever plates / Yu. Yi-wu // Applied Mathematics and Mechanics (English Edition). – 1993. – V. 14. – pp.151-155
6. Jiang L. Lateral Buckling Analysis for Rectangular Cantilever Plate Subjected to a Concentrated Loads / L. Jiang, S. Wu, H. Zheng // Advanced Materials Research. – 2013. – V. 671-674. – pp.1596-1599.
7. Исаулова Т.Н. Устойчивость консольно защемленной косоугольной неоднородной пластины в сверхзвуковом потоке газа / Т.Н. Исаулова, И.М. Лавит // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – № 4(52). – С. 191-204.



8. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер.– М.: Гос. изд-во физ.- мат. литературы.– 1963.– 635 с.

#### References

1. Shaposhnikov, V.M. and B.A. Yartsev. Composite light hull structures and tail unit elements of submarines. Transactions of the Krylov State Research Centre 379(1) (2017): 36–44. (in Russian)
2. Xiang-sheng C. The bending stability and vibration of cantilever rectangular plates. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition, China) 8(7) (1987): 673–683.
3. Xiang-sheng C. On buckling of cantilever rectangular plates under symmetrical edge loading. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition, China) 11(4) (1990): 377–383.
4. Xiang-sheng C. On several problems for lateral instability of cantilever plates. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition, China) 9(8) (1988): 787–792
5. Yi-wu Yu. A polynomial method for solving the problems for lateral instability of cantilever plates. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition, China) 14 (1993): 151-155
6. Jiang L., Wu S. and Zheng H. Lateral Buckling Analysis for Rectangular Cantilever Plate Subjected to a Concentrated Loads. Advanced Materials Research 671-674 ( 2013): 1596-1599.
7. Isaulova, T. N. and I.M. Lavit. Stability of a cantilevered skew inhomogeneous plate in supersonic gas flow. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics 52(4) (2011): 664.
8. Timoshenko, S. and S. Woinowsky-Krieger. Theory of Plates and Shells. McGraw-Hill Book Company. New York, Toronto, London, 1959.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Сергей Олегович Барышников**, доктор технических наук, ректор, заведующий кафедрой основ инженерного проектирования Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: rector@gumrf.ru

**Sergey O. Baryshnikov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Rector, Head of the Department of Engineering Design Fundamentals, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035, St. Petersburg, Dvinskaya, 5/7, e-mail: rector@gumrf.ru

**Михаил Васильевич Сухотерин**, доктор технических наук, заведующий кафедрой высшей математики, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kaf\_math@gumrf.ru

**Mikhail V. Sukhoterin**, Dr. Sci. (Eng), Associate professor, Head of the Department of Higher Mathematics, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035, St. Petersburg, Dvinskaya, 5/7, e-mail: kaf\_math@gumrf.ru

**Татьяна Петровна Кныш**, кандидат физико-математических наук, заместитель директора института водного транспорта, доцент кафедры прикладной математики, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: knyshtp@gumrf.ru

**Tatiana P. Knysh**, Ph.D. (Phys & Math), Associate professor, Head of Department of applied mathematics, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035, St. Petersburg, Dvinskaya, 5/7, e-mail: knyshtp@gumrf.ru

**Наталья Федоровна Пижурин** кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: pizhurinanf@gumrf.ru

**Natalia F. Pizhurina**, Ph.D. (Eng), Associate professor, Head of the Department of Higher Mathematics, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 198035, St. Petersburg, Dvinskaya, 5/7, e-mail: pizhurinanf@gumrf.ru

УДК 629.5.06  
DOI 10.37220/МИТ.2020.48.2.042

## О причинах снижения сопротивления изоляции при эксплуатации гермовводов

М.В. Тепляков<sup>1</sup>, М.Д. Лошенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «Научно-производственный центр «Судовые электротехнические системы»

**Аннотация.** Одним из важнейших изделий, применяемых в промышленности и судостроении, является герметичный кабельный ввод – промежуточная конструкция, обеспечивающая проход электрических цепей через различные виды оболочек, передающих электроэнергию, а также, отвечающая за сохранение герметичности и прочности корпуса. В процессе эксплуатации гермовводов могут возникнуть внештатные ситуации, причину происхождения которых авторам предстояло выяснить в результате лабораторных исследований и расчетов. Испытания изоляции проводов и физико-химический анализ монтажного поля гермовставок показали наличие воды на исследуемых образцах. Возникновение конденсата объясняется многими факторами, такими как: конструктивными и технологическими особенностями изделия, эксплуатационными факторами, например, циклическое изменение температуры на контактах и проводах гермоввода в процессе эксплуатации. Для расчета проницаемости влаги токоведущими жилами гермоввода использовались закон Дарси и метод резистивно-ёмкостных электрических сеток. В результате исследований авторами предлагаются мероприятия по выполнению влагозащитного оконцевания токоведущих жил и проведению поиска изолятора и материала для улучшения технического решения конструкции гермоввода.

**Ключевые слова:** гермоввод, сопротивление изоляции, токоведущая жила, конденсат, монтажное поле гермовставки, закон Дарси, поврежденная изоляция проводов, коэффициент абсорбции, транспирационный ток, гидрофильность.

## About the reasons for the decrease in insulation resistance at operation of hermetic ships cable entry seals

Michael V. Teplyakov<sup>1</sup>, Margarita D. Loshenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Limited liability company "Scientific-production center of "Ship's electrical power system"

**Abstract.** One of the most important products used in industry and shipbuilding is a sealed cable entry - an intermediate structure that ensures the passage of electrical circuits through various types of shells that transmit electricity, and is also responsible for maintaining the tightness and strength of the hull. In the process of operating the pressure glands, emergency situations may arise, the origin of which the authors had to find out as a result of laboratory research and calculations. Tests of insulation of wires and physico-chemical analysis of the installation field of the pressure seal showed the presence of water on the samples. The occurrence of condensate is explained by many factors, such as: design and technological features of the product, operational factors, for example, cyclical changes in temperature at the contacts and wires of the pressure seal during operation. To calculate the moisture permeability of the current-carrying conductors of the pressure seal, the Darcy law and the method of resistive-capacitive electric grids were used. As a result of research, the authors propose measures to perform moisture-proof termination of current-carrying conductors and to search for an insulator and material to improve the technical solution of the pressure seal design.

**Keywords:** cable entry seals, insulation resistance, current carrying conductor, condensate, pressure seal installation field, Darcy's law, damaged insulation of wires, absorption coefficient, transpiration current, hydrophilicity.

Гермовводы (частный случай электрических вводов) представленные в [5], в соответствии с [6] являются изделиями основного производства и, как вид относятся к специфицированным сборочным единицам, собираемым на одном предприятии. Гермоввод, обладая дополнительной функцией герметичности при высоких избыточных давлениях с одной из сторон, является частным случаем кабельного ввода. На рис. 1 изображен один из типовых представителей корабельных гермовводов, в состав которого входит одна сборочная единица (гермовставка – 1), соединяемая с несколькими деталями (штулкой – 2, токоведущими проводами – 3, герметизирующим элементом – 4, термоусадкой – 5) методом свинчивания, пайки, опрессовки. Для установки гермоввода в комплект (корпус судна) гермоввод дополнительно оснащается медной прокладкой, резиновыми кольцами и гайками.



Рис. 1 Корабельный гермоввод

В [7] электрические вводы отнесены к группе 59 «Составные части электротехнического и электронного оборудования». Жизненный цикл оборудования [8] состоит из нескольких периодов — разработки, создания, монтажа и эксплуатации. Наиболее важными этапами цикла являются монтаж и эксплуатация. Все требования надежности, закладываемые при проектировании, обеспечиваются при монтаже и эксплуатации гермовводов.

**Монтаж электрооборудования** – это совокупность действий по его установке и подключению к электросетям, выполняемая в соответствии с проектом. Гермоввод участвует в передаче энергии для различных нужд – непосредственно и в виде сигналов контрольных датчиков, информации и т.п.

**Эксплуатация электрооборудования** — это совокупность всех фаз его существования после изготовления, включая транспортировку к месту применения, подготовку к использованию по назначению, техническое обслуживание, ремонт и хранение. **Производственная эксплуатация** — процесс использования оборудования по своему назначению. В этом процессе участвует электротехнический персонал и персонал, обслуживающий технологические объекты. Результат (продукция) производственной эксплуатации — преобразованная и переданная технологическому объекту энергия (электрическая, механическая, тепловая или световая). **Техническая эксплуатация** — это процесс обеспечения и поддержания требуемого состояния оборудования при использовании или хранении [9].

Все приведённые выше определения необходимы для того, чтобы классифицировать период выполнения работ по монтажу гермовводов в комплекс, испытаний комплекса и отдельных работ по проверке комплектов, в которых составной частью является гермоввод, как эксплуатацию и во всех дальнейших рассуждениях и ссылках будем говорить об эксплуатации именно в этом смысле. Период транспортировки гермовводов от изготовителя на комплекс, хотя данный процесс также по определению является частью эксплуатации, подразумеваем, но не учитываем.

В начале эксплуатации гермовводов во время проведения испытаний одного материально существующего комплекса, детального изучения результатов ранее проведённых испытаний за период с 2015 года, углублённого анализа данных, полученных при исследовании гермовводов с участием специализированных исследовательских центров можно с высокой степенью вероятности говорить о наличии нескольких очевидных причин, которые в той или иной мере могли повлиять на нештатное функционирование гермовводов. Прежде всего, необходимо выявить факторы, влияющие на изготовление, монтаж и на процесс эксплуатации гермовводов. Для этого необходимо рассматривать изменение **химических и физических процессов и факторов**, таких как:

- характер и ход снижения сопротивления изоляции цепей гермовводов от  $\infty$  при постройке (нормальная температура окружающей среды) комплекса к "0" МОм при начальном уменьшении  $R_{из}$  подтверждает факт появления воды на молекулярном уровне, а затем при снижении  $R_{из}$  к значениям близким к "0" вода накапливается уже в количестве достаточном для физического определения. Как показали исследования гермовводов, единственной областью, где проявляется этот эффект, является плоскость, на которой токоведущие штыри контактируют с несколькими диэлектриками: воздух, лак ЭП 730, стекло и эластомер или полимер. Графически ход снижения  $R_{из}$  может быть представлен следующим образом:

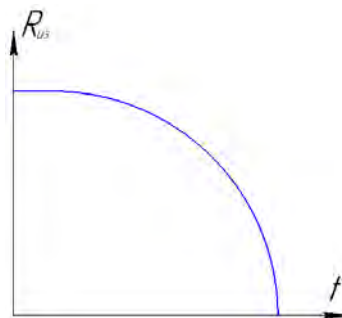


Рис.1 Схематичное изображение снижения  $R_{из}$  в процессе эксплуатации комплекса

- применение стекла С52-1 в качестве изолятора между штырями гермовставок и обеспечивающего прочность материала не является лучшим способом обеспечения электроизоляции токоведущих штырей между собой и по отношению к корпусу гермоввода. Защитное покрытие - лак ЭП 730, используемое для предохранения стекла от взаимодействия с влагой воздуха способно удерживать воду в течение не более 1 часа [10], далее покрытие теряет гидрофобные свойства и начинает впитывать воду, что было экспериментально подтверждено, и становится полупроводником;

- начало массового снижения  $R_{из}$  в отдельных цепях гермоввода со вставкой на стекле начинает происходить с нижней части гермовставки, где на контактном поле (плоскости выхода из изолятора токоведущих штырей) концентрируется влага, поступающая по всем токоведущим жилам\* с нарушенной изоляцией, а затем расширение зоны распространения влаги приводит к дальнейшему снижению  $R_{из}$  в ближайшем от зоны проникновения влаги окружении по направлению вверх (по отношению к горизонту). \*Токоведущая жила — это несколько проволок из меди, скрученных в изолированную оболочку, такая конструкция не обладает продольной герметичностью и по ней (в промежутках между отдельными проволоками может течь вода);

- факт снижения  $R_{из}$  одновременно в нескольких зонах монтажного поля герметичных вставок на стекле подтверждает, что влага на монтажное поле гермовставок проникает сразу по нескольким токоведущим жилам.

Кроме того, обеспечению снижения сопротивления изоляции электрических цепей способствует уровень квалификации работников, выполняющих работы по монтажу гермовводов, а также конструктивные и технологические особенности комплекса такие как:

- все вышедшие из строя гермовводы имели наклон части, содержащей гермовставку, вниз от горизонтали (рис.2, схематично изображены вышедшие из строя гермовставки под номерами 1,1\*,4 и 4\*);

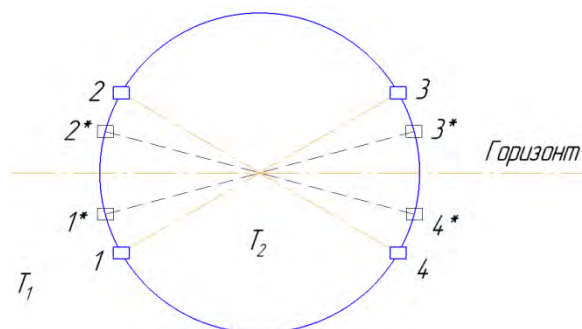


Рис.2 Расположение гермовыводов относительно корпуса, где 1, 1\*, 2, 2\*, 3, 3\*, 4, 4\* - гермовставки;  
 $T_1$  – температура окружающей среды, °С;  
 $T_2$  – температура обитания, °С

- все вышедшие из строя гермовыводы имели сквозные повреждения изоляции проводов на различном удалении от втулки гермоввода;

- высокая насыщенность оборудованием, недостаточный уровень освещения в зонах установки гермовыводов не позволяли осуществлять контроль за выполнением работ, и, в частности, выполнять осмотр целостности изоляции после выполнения работ по установке гермовыводов в кабельные вводы;

- высокая насыщенность помещений комплекса различным оборудованием и слесарным насыщением в местах установки гермовыводов обеспечивает только прямолинейное с небольшим провисом формирование жгутов проводов от гермоввода до кабелей, которая не позволяет располагать сроки, не являющиеся герметичными, ниже гермоввода;

- для удаления термоусадочной трубки, которая является защитным элементом на период транспортировки, со жгута проводов необходимо применять специальный инструмент, не повреждающий изоляцию проводников.

Также на качественные показатели гермовыводов могут влиять и **эксплуатационные факторы**:

- помещения, в которых установлены систематически не штатно функционирующие гермовыводы, имеют повышенную влажность (близкой к 100%) и поэтому поверхности помещений, а также установленного в них оборудования, подвержены образованию на них конденсата. Демонтаж доставленных с комплекса гермовыводов показал наличие капель влаги (конденсата) под термоусадочной трубкой;

- при прохождении электрического тока через проводники гермовыводов происходит разогрев контактов и проводов, что приводит к вытеснению через неплотности (повреждения изоляции, негерметичная заделка мест соединения проводников и т.п.) сухого воздуха из микрополостей, имеющих между проволоками токоведущих жил и изоляционными покровами. При отключении электрооборудования и последующем охлаждении гермоввода происходит засасывание влажного воздуха, которым заполнено помещение комплекса, и осаждение влаги из втянутого воздуха на холодные поверхности токоведущих элементов гермоввода (медные проводники), температура которых равна температуре окружающей среды. Затем под действием гравитационной составляющей

силы влага опускается вниз на контактную поверхность вставки и постепенно накапливается в этой зоне. Чем больше циклов включения-отключения электрооборудования, тем больше влаги накопится в микропустотах. Влага распространяется только вниз от горизонтальной плоскости. Распространению вверх препятствует отсутствие полной смачиваемости материалов, из которых состоят токоведущие жилы. Угол смачивания водой меди и кремнийорганической резины составляет около 40°. Этим объясняется отсутствие нештатной работы гермовыводов, расположенных выше оси и имеющих противоположный угол наклона;

- снижение сопротивления изоляции цепей гермовыводов во время испытаний заказа происходило постепенно в течение длительного времени (от нескольких недель до нескольких месяцев) после перемещения комплекса из сухого помещения в окружающую среду (открытый воздух, вода), что является приобретённым в процессе эксплуатации, к которой относятся и испытания комплекса, качеством. Влага распространяется по плёнке покрытия ЭП-730 и скапливается на границе между лаковым покрытием ЭП 730 и стеклом С52-1. В силовых гермовыводах распространение влаги происходит по токоведущей жиле, затем по штырю в микрозазорах между поверхностью штыря и термоусадкой и переходит на контактное поле вставки.

Технологические особенности отдельных систем комплекса, в составе которых работают гермовыводы, такие как повышенное до 900 В напряжение отдельных цепей и частотный диапазон передаваемых сигналов до 5,1 кГц, также способствуют снижению качества и эксплуатационных параметров гермовыводов. Все гермовыводы с низким сопротивлением изоляции, поступившие для исследования, имели нарушения изоляции проводов до медной жилы со стороны основного корпуса, приобретённые от механического воздействия на изоляцию проводников жёсткими предметами.

*Примечание.* Наличие следов воды в жидкости ПЭС 5, которая может присутствовать в ней в соответствии с ГОСТ, не оказывает существенного влияния на показатели сопротивления изоляции электрических цепей в кабельных вводах, что подтверждается отсутствием не штатно функционирующих гермовыводов, располагаемых выше оси.

### Результаты лабораторных исследований и механизмы расчёта

Проведённые в лаборатории испытания проводов с кремнийорганической изоляцией показали, что неповреждённая изоляция не пропускает воду.

При нарушенной изоляции провод фильтрует воду по токоведущим медным жилам. При этом фильтрация воды (конденсата) по токоведущим жилам осуществляется за счёт гравитационной составляющей и капиллярного эффекта. Время достижения водой поверхностей монтажного поля герметичной вставки зависит от многих факторов таких как: расстояние от места повреждения изоляции в проводах жгутов до монтажного поля; угла наклона жгута и гермоввода по отношению к горизонтали; площади нарушения изоляции;



интенсивности выпадения конденсата на поверхности жгута (подпитки водой), смачиваемости изоляции водой и т. д. Проницаемость, которая для неоднородных (несплошных) сред, входящих в конструкцию гермоввода, подчиняется закону Дарси (Анри Дарси, 1856) – закону фильтрации флюидов [11], к которым относится в том числе и вода, в неоднородной среде, который в виде уравнения баланса сил представляется в следующем виде:

$$-\nabla P - \frac{\eta}{K} \vec{u} + \rho \vec{f} = 0, \quad (1)$$

где  $P$  – внешнее давление,  $\eta$  – динамическая плотность жидкости или газа,  $K$  – коэффициент проницаемости, характеризующий способность пористой среды к пропусканию флюида,  $\vec{u}$  – скорость фильтрации,  $\rho$  – плотность флюида,

$\vec{f}$  – поле внешних сил. Для конструктивно-монтажных узлов, имеющих в сборках уплотнения с применением эластомеров или клеевых конструкций, проницаемость определяется в виде утечки в соответствии с уравнением

$$Q = \Psi_0 \frac{B \Delta P}{l \mu} R_z^3 e^{-\frac{3Pk}{kE}}, \quad (2)$$

где  $Q$  – расход среды,  $\Psi_0$  и  $k$  – коэффициенты, зависящие от качества обработанной поверхности [1],  $B$  – периметр герметизируемых при сборке деталей,  $\Delta P$  – разность давлений,  $l$  – длина или высота уплотнения,  $\mu$  – вязкость среды (флюида),  $R_z$  – чистота обработки сочленяемых поверхностей, зависящая от параметров инструмента и станочного оборудования, используемого при обработке сочленяемых поверхностей,  $E$  – модуль Пуассона (для эластомеров колеблется в пределах 7 – 12 МПа). Расчётная схема замещения для токоввода приведена в [2].

Кроме того, выражения (1) и (2) не учитывают параметров изменения температуры окружающей среды, неоднородности среды, возможности циклического влияния среды, её состава и некоторых других существенных факторов, например, явлений электроосмоса, возникающих при протекании электрического тока [13].

Одним из наиболее подходящих методов, который является некоторым подобием схемы замещения представленной в [3], является метод резистивно-ёмкостных электрических сеток. Аналоговые резистивно-ёмкостные сетки обычно называют электрическими анализаторами (электроинтеграторами), в которых для создания электрической модели применяют законы электротехники и гидравлики. Аналогия между различными системами видна из уравнений, приведенных ниже.

Фильтрация флюида в образце описывается следующим образом:

$$q = \frac{kA}{\mu L} (p_1 - p_2), \quad (3)$$

$$q_1 - q_2 = V_c \frac{dp}{dt}. \quad (4)$$

Движение электрического тока в проводнике можно определить по формулам:

$$I_1 = \frac{1}{R} (U_1 - U_2), \quad (5)$$

$$i_1 - i_2 = C_E \frac{dU}{dt}. \quad (6)$$

Соответствие параметров, указанных в формулах, приведено в таблице 1.

Таблица 1

Наименование величины	Размерность	Наименование величины	Размерность
Давление, $p$	Па	Разность потенциалов (напряжение), $U$	Вольт
Расход флюида, $q$	м <sup>3</sup> /час	Сила тока, $I_1$	Ампер
Объем флюида, $V_c$	м <sup>3</sup>	Емкость электрическая, $C_E$	Фарада
Коэффициент флюидопроводности вещества, $kh/\mu$ ( $k$ – проницаемость вещества по справочнику, м <sup>2</sup> ; $h$ – эффективная толщина образца, м; $\mu$ – динамическая вязкость флюида, Па·с)	м <sup>3</sup> /Па·с	Электрическая проводимость, $1/R$ ( $R$ – сопротивление электрическому току)	Сименс
Истинное время процесса, $t$	с	Время моделирования, $t$	с

Уравнения (3), (4), (5) и (6) отражают однозначную связь следующих величин:

$$q \cong i, \quad (7)$$

$$\frac{1}{R} \cong \frac{kh}{\mu L}, \quad (8)$$

$$p \cong U; \quad (9)$$

где  $L$  – длина образца (3).

Представленная модель течения воды (конденсата) через неплотности под изоляцией проводов справедлива для того случая, когда место повреждения изоляции постоянно находится в воде, т. е. источник воды неиссякаем. По факту конденсат в зоне повреждения изоляции появляется периодически, т.е. по мере образования, и его количество нельзя характеризовать как неиссякаемый источник. Поступление влаги на монтажное поле гермовставки имеет в трёхмерной системе координат только однонаправленное движение (по оси  $Y$ ), т.к. направления по осям  $X$  и  $Z$  ограничены сплошной изоляцией провода.

Эффект распространения фактора снижения  $R_{из}$  в зонах гермоввода по вертикали сверху вниз не подтверждён (т.е. изначально у нижнего проводника в монтажном поле гермоввода, или у имеющего нарушение изоляции и далее вниз), т.к. отсутствуют данные о геометрии расположения в пространстве штырей гермовводов при монтаже. Вместе с тем характер выходов из строя силовых гермовводов (последовательно от одной фазы к другой)

подтверждает эту теорию. Распространение влаги (при наличии перепада по вертикали контактного поля и места повреждения изоляции) по поверхности герметичной вставки от места поступления конденсата вокруг дефекта также имеет место, что косвенно подтверждается разницей данных по  $R_{из}$  и коэффициенту абсорбции проводников, исследованных гермовводов, приведёнными в таблице 2.

Таблица 2  
**Результаты измерений сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции проводников гермовводов**

Измерение по отношению к корпусу			
min. $R_{из}$ , ГОм	min. $K_{абс}$ , о.е.	max. $R_{из}$ , ГОм	max. $K_{абс}$ , о.е.
3,02	0,75	711	2,26
Измерение между проводниками			
min. $R_{из}$ , ГОм	min. $K_{абс}$ , о.е.	max. $R_{из}$ , ГОм	max. $K_{абс}$ , о.е.
1,32	1,03	370	2,42

*Примечание.* Замер  $K_{абс}$  в электрооборудовании класса гермовводов в соответствии с действующими нормативно-техническими документами не производится, однако он позволяет оценить степень загрязнённости изоляции.

Факт поступления воды (конденсированной влаги) на монтажное поле гермовставки с внешней стороны оболочки комплекса был подтверждён специализированной лабораторией в виде результатов физико-химического анализа, в котором было обнаружено наличие ионных образований водорода и гидроксильных групп, образующихся в результате диссоциации воды под действием электрического тока. Наличие металлических включений на монтажном поле вставки только ускоряет процесс нештатной работы гермовводов, а первопричиной является проникновение воды, т.к. в сухом состоянии испытание гермовводов «на пробой» не выявляет это как дефект, хотя очевидно, что необходимо исключить наличие металлических включений на монтажном поле вставки. Учитывая, что в этих случаях пробой изоляции имеет характер теплового, вялотекущего прогрессирующего во времени, то следует предположить правильность этого вывода.

Учитывая, что коэффициент абсорбции характеризует уровень загрязнения изоляции: конденсированная вода, продукты электролитических реакций с участием металлических включений, включения углерода, образующиеся в результате электрического пробоя, а также смываемые водой с поверхности проводов микрочастицы технических загрязнений и в первую очередь её обводнённости, то выводы о необходимости замера  $K_{абс}$  не могут быть лишними. Однако зону снижения сопротивления изоляции следует отнести к той части гермоввода, которая расположена с внутренней стороны оболочки комплекса, а не со стороны кабельного ввода.

Кроме того явно полезным был опыт с гермовводом управления, подвешенным вертикально (вставка вверху), и циклический прогрев гермовставки с осуществлением замеров сопротивления изоляции. Факт повышения

сопротивления изоляции подтверждает правильность предлагаемых выводов.

Лабораторные исследования провода ПВКВ, помещённого вертикально в ёмкость с окрашенной жидкостью, показал, что жидкость поднимается по токоведущей жиле по отношению к поверхности жидкости на высоту не более 5 мм. Это можно объяснить тем, что понятие капиллярного эффекта по отношению к каналам в токоведущей жиле можно применять условно, т. к. по определению «капилляр (от лат. capillaris — волосной)». Средний диаметр капилляра составляет 5—10 мкм». Расстояние между проволочками в токоведущей жиле существенно превышает эти размеры.

Рассмотрим механизм подъема жидкости на примере поступления воды в растение из почвы. Низкий водный потенциал атмосферы обуславливает потерю воды на транспирацию (процесс движения воды через растение и её испарение) через листья и непрерывное перемещение молекул воды в стволе растения от клетки к клетке – по градиенту потенциала. Испарение молекул воды в верхней части водного столба, заполняющего ксилему (водопроводящая ткань растений), заставляет воду течь по трубкам ксилемы вверх для восполнения этой потери. Это вызванное транспирацией перемещение воды, так называемый транспирационный ток, в свою очередь обуславливает поступление воды в растение из почвы, также по градиенту водного потенциала.

Из-за транспирации водный потенциал в верхней части растения ниже, чем у его основания, кроме того, нередко скорость испарения воды больше скорости ее поступления, т.к. и клеточные стенки и эндодерма корня оказывают сопротивление движению воды. Вследствие этого в водных столбах, заполняющих ксилему высоких растений, существует отрицательное давление, т.е. натяжение [12]. Но явление транспирации характерно только для растений, т.о. процессы подъема и опускания жидкости, протекающие в каналах токоведущих жил гермовводов подчиняются только капиллярному эффекту.

В ходе работ по поиску причины некорректной работы гермовводов в процессе эксплуатации можно сделать вывод о том, что совокупность воздействия всех факторов требует дополнительных исследований и определения материалов, удовлетворяющих функциональным свойствам гермовводов.

Результатом исследований и расчетов в рамках данной работы становятся очевидными следующие **предложения по конструктивной и технологической доработке исследованных конструкций гермовводов:**

- Исключение из конструкции гермовводов вставки на основе стекла С52-1 и замена их на вставки на основе ДСВ-2л или керамики на основе оксида алюминия с обрешиванием поверхности аналогично силовым гермовводам и композитным с различным по сечению проводниками. Состав резины или резиноподобного герметика необходимо изменить на однозначно изоляционный, способный работать в жидком диэлектрике, которым заполняется кабельный ввод;

- необходимо осуществить замену жидкости ПЭС-5 на другой жидкий, электроизолирующий состав;
- следует обеспечивать выполнение требований нормативно-технической документации в части выполнения влагозащитного оконцевания токоведущих жил со стороны помещений комплекса.

#### Заключение

1. Основным и главным фактором, который приводит к нештатной работе гермовводов, является

протекание влаги, образующейся из конденсата на токоведущих жилах гермовводов со стороны помещений комплекса через нарушения изоляции проводов, на монтажные поверхности гермовставок;

2. Применение стекла С52-1 в качестве изолятора и материал для исключения явления гидрофильности стекла не являются лучшим техническим решением из-за их структуры и физико-химических свойств, поэтому требуется проведение соответствующих работ по поиску материалов для их замены.

#### Литература

1. Лазаревский Н.А., Тепляков М.В. О механизмах проницаемости токовводов. /Судостроение. 2012. №6.
2. Лазаревский Н.А., Тепляков М.В. К вопросу определения количественной оценки проницаемости токовводов. /Судостроение. 2013. №1.
3. Тепляков М.В. К вопросу о моделировании при решении задач, связанных с поиском технических решений для конструкций современных токовводов. / Судостроение. 2014г., №1, с.45-48.
4. Ланин В., Керенцов А., Соловьёв Я. Факторы, влияющие на герметичность мощных транзисторов в металлокерамических и металlostеклянных корпусах // Силовая электроника. – 2010.-№2. –С. 106-111
5. Корабельные гермовводы для экстремальных условий эксплуатации. Теория и описание конструкции: монография / М. В. Тепляков; Центр развития науч. сотрудничества. - Новосибирск : ЦРНС, 2014. - 162 с.
6. ГОСТ 2.101-68 ЕСКД. Единая система конструкторской документации. Виды изделий.
7. Р 50.5.002-2001 Каталогизация продукции для федеральных государственных нужд. Единый кодификатор предметов снабжения и порядок разработки и ведения разделов федерального каталога продукции для федеральных государственных нужд.
8. ГОСТ РВ 15.004-2004. Система разработки и постановки продукции на производство (СРПП). Военная техника. Стадии жизненного цикла изделий и материалов.
9. Гашенко А.А. Эксплуатация электрооборудования. Конспект лекций, Кинель, 2012.[Электронный ресурс] // URL: <https://studopedia.org>7-11918.html>
10. ГОСТ 9.403-80 (СТ СЭВ 5260-85), разд.1. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрyтия лакокрасочные. Методы испытаний на стойкость к статическому воздействию жидкостей.
11. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации. — М.: Изд-во ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ, 2009. — С. 24–29. — 88 с.
12. Гэлстон А., Девис П., Сэттер Р. Жизнь зеленого растения — Москва: Мир, 1983. — 552 с.
13. Тепляков М.В. О применении электроосмоса при изготовлении и ремонте токовводов в судовом электромонтажном производстве. / Судостроение. 2013. №6, 80-84 с.

#### References

1. Lazarevskij N.A., Teplyakov M.V. O mexanizmax proniczaemosti tokovvodov. Sudostroenie [On the mechanisms of permeability of hermetic seal connectors]. 2012. №6.
2. Lazarevskij N.A., Teplyakov M.V. K voprosu opredeleniya kolichestvennoj ocenki proniczaemosti tokovvodov [On the issue of determining the quantitative assessment of the permeability of hermetic seal connectors]. Sudostroenie. 2013. №1.
3. Teplyakov M.V. K voprosu o modelirovanii pri reshenii zadach, svyazanny`x s poiskom texnicheskix reshenij dlya konstrukcij sovremenny`x tokovvodov [To the question of modeling in solving problems related to the search for technical solutions for the construction of modern hermetic seal connectors]. Sudostroenie. 2014, №1, p.45-48.
4. Lanin V., Kerenczov A., Solov`yov Ya. Faktory`, vliyayushhie na germetichnost` moshhny`x tranzistorov v metallokeramicheskix i metallosteklyanny`x korpusax [Factors affecting the tightness of high-power transistors in metal-ceramic and metal-glass cases ]. Silovaya e`lektronika. 2010.№2. p. 106-111.
5. Korabel`ny`e germovvody` dlya e`kstremal`ny`x uslovij e`kspluatacii. Teoriya i opisanie konstrukcii: monografiya .[ Hermetic seal connectors for extreme operating conditions. Theory and design description: monograph]M. V. Teplyakov ; Centr razvitiya nauch. sotrudnichestva. Novosibirsk: CRNS, 2014. - 162 p.
6. GOST 2.101-68 ESKD. Edinaya sistema konstruktorskoj dokumentacii. Vidy` izdelij [Unified system of design documentation. Types of products].
7. R 50.5.002-2001 Katalogizaciya produkcii dlya federal`ny`x gosudarstvenny`x nuzhd. Ediny`j kodifikator predmetov snabzheniya i poryadok razrabotki i vedeniya razdelov federal`nogo kataloga produkcii dlya federal`ny`x gosudarstvenny`x nuzhd [Product cataloging for federal state needs. A unified codifier of supplies and the procedure for developing and maintaining sections of the federal product catalog for federal state needs.].
8. GOST RV 15.004-2004. Sistema razrabotki i postanovki produkcii na proizvodstvo (SRPP) [The system of development and putting products into production]. Voennaya texnika. Stadii zhiznennogo cikla izdelij i materialov.
9. Gashenko A.A. E`kspluataciya e`lektrooborudovaniya [Operation of electrical equipment.]. Konspekt lekcij, Kinel`, 2012.[E`lektronny`j resurs] URL: <https://studopedia.org>7-11918.html>
10. GOST 9.403-80 (ST SE`V 5260-85), razd.1. Edinaya sistema zashchity` ot korrozii i stareniya (ESZKS) [Unified corrosion and aging protection system]. Pokry`tiya lakokrasochny`e. Metody` ispy`tanij na stojkost` k staticheskomu vozdejstviyu zhidkostej.

11. Leont'ev N.E. Osnovy` teorii fil'tracii [Fundamentals of filtering theory]. M.: CzPI MGU, 2009. 88 p.
12. Ge'iston A., Devis P., Se'tter R. Zhizn` zelenogo rasteniya [Green plant life]. Moskva: Mir, 1983. 552 p.
13. Teplyakov M.V. O primenении elektroosmosa pri izgotovlenii i remonte tokovvodov v sudovom elektromontazhnom proizvodstve [On the use of electroosmosis in the manufacture and repair of hermetic seal connectors in ship electrical installation]. Sudostroenie. 2013. №6. p.80-84.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Михаил Васильевич Тепляков**, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе, ООО «Научно-производственный центр «Судовые электротехнические системы», 196128, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6, e-mail: temiva1948@yandex.ru

**Michael V. Teplyakov**, Ph.D. (Eng), deputy director general for research and developmental works Limited liability company "Scientific-production center of "Ship's electrical power system", Blagodatnaya st., 6, St. Petersburg 196128, Russian Federation, e-mail: temiva1948@yandex.ru

**Мargarита Дамировна Лошенко**, аспирант, инженер-технолог 2 категории, ООО «Научно-производственный центр «Судовые электротехнические системы», 196128, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6? e-mail: margarita5250@yandex.ru

**Margarita D. Loshenko**, graduate student, engineer 2 categories Limited liability company "Scientific-production center of "Ship's electrical power system", Blagodatnaya st., 6, St. Petersburg 196128, Russian Federation, e-mail: margarita5250@yandex.ru



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

УДК 621.438.1 ... 621.438.2  
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.006

### **Потери кинетической энергии потока газа на краях активных дуг осевых малорасходных турбин**

Ю.В. Соломахин<sup>1</sup>, Л.П. Цыганкова<sup>2</sup>, И.В. Невская<sup>3</sup>, А.Ю. Фершалов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, <sup>2</sup>Дальневосточный Федеральный Университет, <sup>3</sup>Дальневосточная пожарно-спасательная академия – филиал Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России,

**Аннотация.** Работа посвящена оценке потери кинетической энергии потока газа на краях активных дуг осевых малорасходных турбин, имеющих в своем составе сопловые аппараты с углами установки сопел менее 9° и рабочими колесами с большим относительным шагом рабочих лопаток. Представлены результаты экспериментальных исследований ступеней исследованных малорасходных турбин со средним диаметром соплового аппарата 250 мм в диапазоне варьирования отношения давления перед соплами соплового аппарата к давлению за рабочим колесом от 2.0 до 5.0, частоты вращения ротора от 0 до 14000 об/мин.

Представлены результаты исследований потерь мощности и потерь энергии на вентиляцию и трение дисков рабочих колес ступеней исследованных турбин с различными величинами отношения давления перед соплами соплового аппарата к давлению за рабочим колесом; зависимость коэффициента потерь энергии на краях активных дуг подвода при различной парциальности.

Указано, что при малых степенях впуска (степень парциальности низкая) интенсивность увеличения потерь мощности на краях активных дуг исследуемых турбин с уменьшением отношения давления перед соплами соплового аппарата к давлению за рабочим колесом снижается.

**Ключевые слова:** потеря мощности, активная дуга, сопло, рабочее колесо, газодинамика, парциальность.

### **Loss of kinetic energy gas flow on the edges of active arcs of axial low-disposable turbines**

Yuriy V. Solomakhin<sup>1</sup>, Lyudmila P. Tsigankova<sup>2</sup>, Irina V. Nevskaya<sup>3</sup>, Andrey Y. Fershalov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Vladivostok State University Economics and Service, <sup>2</sup>Far Eastern Federal University, <sup>3</sup>Far Eastern Fire and Rescue Academy - a branch of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia.

**Abstract.** The work is devoted to estimating the loss of kinetic energy of the gas flow at the edges of active arcs of axial low-consumption turbines incorporating nozzle apparatuses with nozzle installation angles of less than 9° and working wheels with large relative pitch of the blades. The results of experimental studies of stages of low-consumption turbines with an average nozzle diameter of 250 mm in the range of variation of the ratio of the pressure in front of the nozzles of the nozzle apparatus to the pressure behind the impeller from 2.0 to 5.0, the rotor speed from 0 to 14000 rpm are presented.

The results of studies of power losses and energy losses for ventilation and friction of the wheels of the impeller wheels of the investigated turbines with different values of the ratio of the pressure in front of the nozzles of the nozzle apparatus to the pressure behind the impeller are presented; dependence of the coefficient of energy loss at the edges of active supply arcs at different partialities.

It is indicated that at low inlet degrees (low degree of partialness), the intensity of power loss at the edges of the active arcs of the turbines under study decreases with a decrease in the ratio of pressure in front of the nozzles of the nozzle apparatus to the pressure behind the impeller.

**Keywords:** power loss, active arc, nozzle, impeller, gas dynamics, partialness.

#### **Введение**

В настоящее время турбинный пневматический привод имеет широкое распространение в качестве преобразователя потенциальной энергии воздуха в механическую работу на валах приводных механизмов в различных областях техники.

В то же время, при использовании в подобных конструкциях турбин с малыми размерами проточных частей, необходимо отметить, что турбинам рассматриваемого класса объективно присущи низкие значения КПД. Это связано с часто применяемым парциальным подводом газа к рабочему колесу и влиянием "масштабного" фактора: большими относительными величинами толщины кромки лопаток, зазоров, шероховатости, малой величиной

относительной высоты лопаток, малыми числами Рейнольдса и т.д. Все вышесказанное предопределяет задачу – создание эффективных машин и механизмов с турбинами, имеющими малые размеры проточных частей и работающих при малых расходах воздуха. Выполняется это за счет оптимального профилирования элементов турбины на основе объективных исследований влияния на эффективность турбины различных факторов. Исследования, проведенные в ДВФУ выявили основные зависимости различных факторов на КПД микротурбин [1], а также на эффективность сопловых аппаратов [2,3] и рабочих колес. Особое внимание было уделено исследованию изменения степени реактивности при варьировании изучаемых факторов, т.к. значение этого параметра

сильно влияет на газодинамические характеристики газа в области между рабочим колесом и сопловым аппаратом. Анализ полученных результатов позволил спроектировать ступень новой конструкции [4], определиться со способом крепления рабочего колеса на валу турбины с учетом ликвидации самооткручивания крепежной гайки, характеристики рабочих колес с большим относительным шагом подробно изложены в работе [5]. Продолжение дальнейших исследований планируется с использованием акустических методов. Перенос результатов исследований на другие размеры проточных частей турбин предлагается осуществлять на основании методики, изложенной в работе [6]. Проблемы эксплуатации подобных турбин, заключающиеся в повышенных частотах вращения ротора, для работы в оптимальном диапазоне режимов предлагается решать с помощью подшипников на газовой смазке [7].

### Постановка задач исследования

Несмотря на большое количество работ, связанных с потерями энергии в турбинах, малоизученной осталась такая область как исследование потерь энергии на краях активных дуг осевых парциальных турбин.

Условность разделения потерь от парциального подвода и сложность процессов, происходящих на краях активных дуг не позволяют окончательно решить вопрос об универсальной форме определения этих потерь. Существует ряд подходов при выборе модели явлений, происходящих в исследуемой области. Можно считать, что основная доля потерь приходится на создание и поддержание начального вихря, хотя трудно объяснить весь комплекс процессов только установлением циркуляционного течения вокруг входящего в струю профиля рабочей лопатки.

Допускается считать главной частью краевых потерь – потери при внезапном расширении истекающей из сопла струи в каналах рабочего колеса при смешении активного и пассивного газа. Эти потери учитывают введением поправки на величину коэффициента скорости при полном подводе, т.е. практически суммируют с профильными потерями. Такой подход не отражает краевые потери изолированно от других явлений. Кроме всего прочего имеется возможность определять краевые потери как сумму энергии, затрачиваемой на разгон неподвижного газа в межлопаточных каналах и энергии газа, уносимой рабочим колесом из зоны подвода лишь частью потерь на краях активной дуги.

Большое количество теорий и отсутствие единого подхода к решению проблемы объясняется сложностью процессов. Стремление упростить задачу связано с возможностями физического эксперимента. Только с его помощью можно оценить влияние каждой из составляющих потерь путем анализа результатов специально поставленных опытов, несмотря на то, что такой подход позволяет распространить результаты исследований только на подобные турбины. Опираясь на вышесказанное были проведены экспериментальные исследования на стенде СПбПУ кафедры "Турбины, гидромашин и авиационные двигатели".

### Анализ результатов

На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости потери мощности от концевых участков дуг подвода.

Надо отметить, что эти данные были получены на ступенях с одинаковой величиной степени парциальности и различным числом дуг подвода. Достигалось это за счет закрытия ряда сопел в различном порядке и последовательностью. Так как суммарное количество работающих сопел всегда оставалось одинаковым, то и расход газа при одинаковых режимных параметрах не менялся, т.е. теоретически возможная мощность турбины оставалась постоянной. Уменьшение мощности турбины от краевых потерь определялось различным методом с внешних характеристик. При этом сделано допущение о том, что все остальные потери остаются постоянными и не зависят от изменения режима.

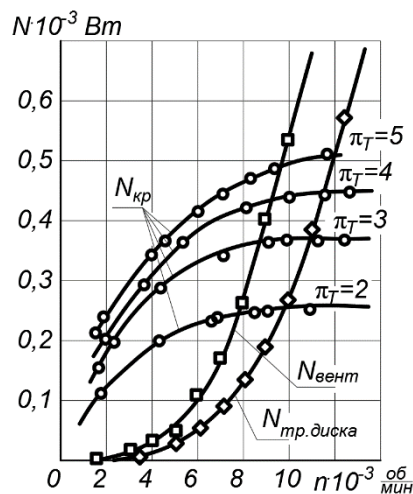


Рис. 1. Потери мощности на краях активных дуг, на трение и вентиляцию рабочего колеса конструкции СПбГПУ

Резкое увеличение потерь на начальном участке зависимостей объясняется в большей степени нерасчетностью режима, что приводит к возрастанию отдельных составляющих потерь кинетической энергии потока. С увеличением теплоперепада на ступень абсолютная величина потерь увеличивается, однако, за счет значительного увеличения теоретической мощности, соответствующей располагаемому теплоперепаду, доля потерь кинетической энергии уменьшается. Общий уровень потерь на краях активной дуги значительно меньше потерь, приведенных в технической литературе. Такая особенность рассматриваемого типа малорасходных турбин, как малое количество лопаток рабочего колеса и малая степень реактивности, приводит к тому, что снижается доля потерь кинетической энергии потока газа от подсоса и утечек на концах дуги подвода. Кроме того, отрицательные угла атаки на расчетном режиме улучшают обтекание рабочих лопаток на границах подвода, снижая потери от не заполнения межлопаточных каналов. Доля потерь от выколачивания не превышает 6%, что несколько ниже потерь от вентиляции и трения диска на расчетном режиме (рис.2).

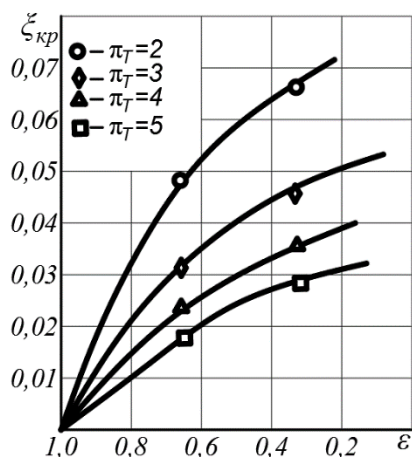


Рис. 2. Зависимость коэффициента потерь энергии на краях активных дуг подвода при различной парциальности

Обращает на себя внимание доля потерь энергии на остановленной турбинной ступени. Эта величина составляет около 1%. Такой уровень потерь можно объяснить тем, что основная доля потерь кинетической энергии потока газа приходится на выколачивание и разгон инертного рабочего тела (газ или пар) на протяженных рабочих каналах. В случае заторможенного рабочего колеса такие потери отсутствуют, кроме того, отсутствуют потери на смешивание и вихреобразование потока газа на краях активной дуги подвода, являющихся границами между газом, производящим работу в рабочем колесе и неактивного (пассивного или застойного) газа,

находящегося на дуге, где отсутствуют выходные части (косые срезы) сопел.

У исследованной конструкции турбинной ступени с малым углом выхода потока рабочего тела (девять сопловых каналов), большим углом поворота потока в межлопаточных каналах и большим относительным шагом, ограничены возможные вариации размещения дуг подвода газа к лопаткам рабочего колеса для получения более точных зависимостей. В связи с этим экспериментально были получены только три точки для построения зависимости влияния степени парциальности на краевые потери.

### Заключение

Результаты исследования показали, что потери кинетической энергии потока газа на краях активной дуги подвода необходимо представлять, как сумму отдельных составляющих, таких как:

- затрачивание кинетической энергии потока газа на подсос (в начале дуги в направлении вращения рабочего колеса) и утечку газа (в конце активной дуги);
- истечение газа из каналов рабочего колеса при удалении от активной зоны;
- выколачивание газа не участвующего в работе турбины из неактивной зоны;
- образование вихрей в потоке газа при попадании последнего из неактивной в активную зону;
- перемешивание потока газа на границах активной и неактивной зон;
- потерь вследствие обтекания неравномерным потоком газа рабочих лопаток на границах между активной и неактивной зонами.

### Литература

1. Фершалов Ю.Я., Соловьев С.П., Коршунов В.Н., Цыганкова Л.П. Эффективность малорасходной турбины с малыми конструктивными углами выхода сопел соплового аппарата // Морские интеллектуальные технологии. 2013. № S2. С. 80-83.
2. Fershalov Yu.Ya., Fershalov M.Yu., Fershalov A.Yu. Energy efficiency of nozzles for axial microturbines // Procedia Engineering (см. в книгах). 2017. Т. 206. С. 499-504.
3. Фершалов Ю.Я., Фершалов А.Ю., Фершалов М.Ю. Влияние степени расширения сопел с малым углом выхода на эффективность сопловых аппаратов малорасходных турбин // Судостроение. 2012. № 1 (800). С. 39-41.
4. Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я., Поршкевич В.В., Камаев Н.А. Конструкция ступени осевой турбины с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловый аппарат (05.08.05) // Морские интеллектуальные технологии. 2017. Т. 3. № 4 (38). С. 94-98.
5. Фершалов А.Ю., Грибиниченко М.В., Фершалов Ю.Я. Газодинамические характеристики рабочих колес осевых турбин с большим углом поворота проточной части // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2012. № 1 (86). С. 88-98.
6. Fershalov Yu.Ya. Technique for physical simulation of gasodynamic processes in the turbomachine flow passages // Russian Aeronautics. 2012. Т. 55. № 4. С. 424-429.
7. Грибиниченко М.В., Куренский А.В., Фершалов Ю.Я. Обобщенная математическая модель осевых подшипников с газовой смазкой элементов судовых энергетических установок // Морские интеллектуальные технологии. 2011. № S1. С. 21-23.

### References

1. Fershalov YU.YA., Solov'ev S.P., Korshunov V.N., Tsiganikova L.P. Effektivnost' maloraskhodnoy turbiny s malymi konstruktivnymi uglami vykhoda sopel soplovogo apparata [Efficiency of a low-flow turbine with small design nozzle exit angles]. // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2013. № S2. S. 80-83.
2. Fershalov Yu.Ya., Fershalov M.Yu., Fershalov A.Yu. Energy efficiency of nozzles for axial microturbines // Procedia Engineering (см. в книгах). 2017. Т. 206. С. 499-504.
3. Fershalov YU.YA., Fershalov A.YU. Fershalov M.YU. Vliyanie stepeni rasshireniya sopel s malym uglom vykhoda na effektivnost' soplovykh apparatov maloraskhodnykh turbin [The effect of the degree of expansion of nozzles with a small exit angle on the efficiency of nozzle devices of low-flow turbines]. // Sudostroenie. 2012. № 1 (800). S. 39-41.

4. Fershalov A.YU. Fershalov YU.YA. Porshkevich V.V., Kamaev N.A. Konstruktsiya stupeni osevoy turbiny s chastichnoy integratsiyey rabocheho koleasa v soplovooy apparat (05.08.05) [Axial turbine stage design with partial integration of the impeller into the nozzle apparatus].// Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2017. T. 3. № 4 (38). S. 94-98.
5. Fershalov A.YU. Gribinichenko M.V., Fershalov YU.YA. Gazodinamicheskie kharakteristiki rabochikh koleas osevykh turbin s bol'shim uglom povorota protochnoy chasti [Gas-dynamic characteristics of impellers of axial turbines with a large angle of rotation of the flow part]. // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie. 2012. № 1 (86). S. 88-98.
6. Fershalov Yu.Ya. Technique for physical simulation of gasodynamic processes in the turbomachine flow passages // Russian Aeronautics. 2012. T. 55. № 4. С. 424-429.
7. Gribinichenko M.V., Kurenskiy A.V., Fershalov YU.YA. Obobshchennaya matematicheskaya model' osevykh podshipnikov s gazovoy smazkoy elementov sudovykh energeticheskikh ustanovok [Generalized mathematical model of axial bearings with gas lubrication of elements of marine power plants].// Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2011. № S1. S. 21-23.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Юрий Васильевич Соломахин**, кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных процессов и технологий, Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя 41. e-mail: y.solomahin@mail.ru

**Людмила Петровна Цыганкова** доцент кафедры судовой энергетики и автоматики Дальневосточный Федеральный Университет 690091 г. Владивосток, ул. Суханова, 8 e-mail: rectorat@vvsu.ru

**Ирина Владимировна Невская** Старший преподаватель кафедры естественно-научных и специальных дисциплин Дальневосточной пожарно-спасательной академии – филиал Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8 e-mail: rectorat@dvfu.ru

**Андрей Юрьевич Фершалов** кандидат технических наук, доцент кафедры судовой энергетики и автоматики. Дальневосточный Федеральный Университет. 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8 e-mail: rectorat@dvfu.ru

**Yuri V. Solomakhin** Ph.D. (Eng), department of transport processes and technologies. Vladivostok State University Economics and Service. Gogolya str. 41, Vladivostok, 690014, Russian Federation. e-mail: rectorat@vvsu.ru

**Lyudmila P. Tsigankova** the assistant professor of department of ship power engineering and automation Far Eastern Federal University Suhanova str., 3, Vladivostok 690950, Russian Federation. e-mail: rectorat@vvsu.ru

**Irina V. Nevskaya** The senior lecturer of the Department of Natural Sciences and Special Disciplines of the Far Eastern Fire and Rescue Academy is a branch of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia. 690091, Vladivostok, st. Sukhanova, 8, Email: rectorat@dvfu.ru

**Andrey Yu. Fershalov** Ph.D. (Eng), department of ship power engineering and automation. Far Eastern Federal University Suhanova, 8, Vladivostok 690950, Russian Federation e-mail: rectorat@dvfu.ru



УДК 629.067

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.043

## Методы автоматического анализа параметров вибрации для диагностики судовых роторных машин

Д.В. Грищенко<sup>1</sup><sup>1</sup>Ассоциация ВАСТ

**Аннотация.** Автоматическое диагностирование ответственных роторных машин по вибрации является одним из основных способов обеспечения их надежности и безопасности эксплуатации. Известные методы автоматической обработки вибрационных параметров в диагностических целях обладают ограниченной эффективностью в судовых условиях из-за нестабильной виброактивности машин в установившихся режимах их работы, вынуждающей завышать пороги опасности, и существенного взаимовлияния близко расположенных узлов и агрегатов, приводящего к ошибочным диагнозам. Для решения первой указанной проблемы предложен метод адаптации пороговых значений, позволяющий своевременно обнаружить и прогнозировать ухудшение технического состояния судовых роторных машин. Для решения второй проблемы предложен инвариантный к типу объекта контроля метод автоматического определения причин ухудшения технического состояния судовых роторных машин, который позволяет конфигурировать диагностические правила в табличном виде с возможностью учета влияния дефектов на вибрацию разнесенных в пространстве точек. Рассмотренные методы успешно используются в системах диагностирования роторного оборудования по вибрации.

**Ключевые слова:** автоматическая диагностика; вибрация; судовое роторное оборудование; адаптация порогов; техническое состояние; безопасность эксплуатации; анализ параметров.

## Automatic analysis methods of vibration parameters for diagnosis of marine rotating machines

Dmitriy V. Grishchenko<sup>1</sup><sup>1</sup>Association VAST

**Abstract.** Automatic diagnosis of important rotating equipment using vibration signal is one of the main ways to ensure their reliability and operational safety. Known methods for automatically processing vibration parameters for machinery diagnostics have insufficient effectiveness on shipboard. The reason for this is unstable vibration activity in steady operating modes, which requires increasing thresholds, and the mutual influence of neighboring mechanical components and machines, which leads to erroneous diagnoses. The article provides methods to solve these problems. The first threshold adaptation method allows timely detection and reasonable prediction of marine machinery condition deterioration. The second automatic diagnosis method allows determining causes of this condition deterioration. The diagnosis method does not depend on the type of machine and uses the configuration of diagnostic rules in table form. In addition, this method allows to use defects influence on vibration at spaced control points. Declared methods are successfully applied in diagnostics systems of rotating machines.

**Key words:** automatic diagnosis; vibration; marine rotating equipment; thresholds adaptation; technical condition; operational safety; analysis of parameters.

### Введение

Контроль и прогноз технического состояния ответственных судовых машин является эффективным способом обеспечения их надежности и безопасности эксплуатации, особенно, когда резервирование или повышение коэффициентов запаса невозможны или экономически нецелесообразны. Для определения технического состояния роторных машин без изменения их режимов работы могут использоваться параметры рабочих и вторичных процессов. Параметры рабочих процессов, традиционно измеряемых на судах централизованными системами контроля и управления, обычно не обеспечивают надежной заблаговременной оценки технического состояния, поскольку такие параметры являются инерционными и не реагируют на многие развитые дефекты вплоть до наступления предаварийного состояния.

В силу циклического характера работы роторных машин, эффективным для диагностирования является сигнал вибрации [1], параметры которого мгновенно изменяются с появлением большинства неисправностей, что позволяет по фактическому состоянию оперативно управлять такими машинами

и проводить их обслуживание и ремонт. В то же время диагностика машин с возвратно-поступательными узлами, в частности двигателей внутреннего сгорания, не настолько эффективна из-за наличия в них естественных ударных взаимодействий.

В советских корабельных системах параметры вибрации измерялись для оценки виброактивности оборудования с целью обеспечения скрытности, а идентификация причин повышенной вибрации не осуществлялась [2]. Поэтому измерения производились в точках перехода вибрации в фундаментные конструкции и неопорные связи, а в качестве метода анализа использовался третьекластный, обладающий достаточной детальностью для оценки наиболее мощных компонент вибрации, влияющих на гидродинамический шум. Параллельно исследовались и методы диагностики дефектов роторных машин по вибрации. Их особенностью было измерение вибрации в точках ее перехода с вращающихся узлов на неподвижные, т.е. в опорах вращения, где локализуется высокочастотная вибрация от ближайших ее источников. Широкое внедрение данных методов в России началось с 90-х

годов в промышленности, что связано с необходимостью перехода с технологии планово-предупредительных ремонтов на более выгодное обслуживание оборудования по фактическому состоянию и необходимостью защиты ответственных нерезервируемых машин от непрогнозируемых отказов. Основными методами анализа вибрации в целях диагностики уже несколько десятков лет являются узкополосный спектральный анализ исходного сигнала, огибающей его высокочастотной части [3] и метод ударных импульсов [4], которые дополняются другими методами анализа в зависимости от накопленного опыта, применяемых методик и требований стандартов.

В промышленности методы и средства вибродиагностики хорошо себя зарекомендовали, но внедрение данных технологий на транспорте сопряжено с сложностями, связанными в первую очередь с нестабильностью вращения, нагрузок и прочих влияющих на виброактивность факторов в условиях эксплуатации. Для наземного и воздушного транспорта данную проблему можно решить с помощью измерений с необходимой периодичностью в стендовых условиях. Такой подход успешно применяется в железнодорожном транспорте для диагностирования колесно-моторных блоков путем поддомкрачивания локомотивов [5]. Очевидно, что для судового оборудования такой подход неприменим – использование измерений во время стоянок судна в порту не эффективно из-за невозможности запланировать их график с требуемой для диагностики периодичностью. В связи с этим остается осуществлять диагностирование во время плавания, причем с использованием полностью автоматических стационарных многоканальных систем непрерывного контроля, что продиктовано отсутствием среди экипажа специалистов по диагностике, тенденцией к автоматизации сложных процессов, производимых на судах и необходимостью быстрой реакции на резкое ухудшение состояния оборудования из-за ошибок управления.

Наибольшую научную ценность в таких системах представляют методы и реализующие их алгоритмы для выделения и обработки вибрационных параметров с целью постановки диагнозов, каждый из которых включает в себя вид дефекта, степень его опасности и прогноз дальнейшего развития. Можно выделить три основные задачи, которые решают данные методы и соответствующие алгоритмы: выделение параметров из исходного сигнала вибрации, выявление диагностически значимых изменений вибрационных параметров и их прогнозирование, идентификация причин изменения вибрационных параметров. В статье рассмотрено решение двух последних задач, что продиктовано в том числе их связью по входным/выходным данным.

### 1. Обнаружение изменения технического состояния

Традиционно в качестве опорной величины для оценки изменений вибродиагностических параметров используется базовое значение, определение которого в соответствии с государственными и международными стандартами должно проводиться в условиях эксплуатации в стабильном вибрационном состоянии отдельно для

каждого выделенного режима [6]. Стабильность виброактивности позволяет не только оценить базовый уровень как среднее, но и применить типовые относительные пороги, которые в зависимости от частотной области и типа параметра соответствуют 6-10 дБ для предупреждения об изменении состояния и 12-20 дБ для принятия решений в связи с опасным состоянием [1]. Однако данный способ, который можно назвать стандартным, приводит к существенным ошибкам во время плавания, поскольку виброактивность может меняться (см. рис. 1) даже в выделенных установившихся (по контролируемым рабочим параметрам) режимах из-за таких факторов как качка, нестабильность нагрузки, колебания параметров рабочей и внешней среды и прочих причин. Стоит отметить, что подобные изменения свойственны и некоторым промышленным объектам.

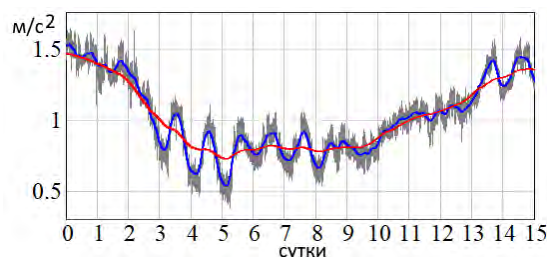


Рис. 1. Изменение уровня вибрации на частоте вращения турбогенератора в установившемся режиме работы

Типовым решением в такой ситуации, которое также предписано стандартами, является увеличение заранее заданных порогов состояния [7], или определение порогов по среднему, увеличенному на заданное число стандартных отклонений, учитывающее максимальные уровни естественных разнонаправленных изменений [6]. Такой подход может привести к существенно запаздывающей реакции на относительно быструю деградацию состояния, начало которой совпадает с нижней границей интервала естественных изменений, связанных с действием внешних факторов. Для решения данной проблемы предлагается метод адаптации пороговых значений, который основан на следующем тезисе, подтвержденном многолетним опытом анализа трендов диагностических параметров роторного оборудования различного вида: если параметр на некотором временном интервале увеличивается на величину, не соответствующую ранее неоднократно наблюдаемым разнонаправленным изменениям на том же интервале, то это говорит либо о нетиповом влияющем на виброактивность факторе, либо об изменении технического состояния. Проверить истинность одного из двух утверждений можно с помощью диагностирования: совокупность изменений различных параметров, вызванных даже нехарактерным внешним воздействием не должны соответствовать ни одному из типовых дефектов. Причем, поскольку сами внешние факторы могут меняться с разной скоростью и цикличностью, то и оценивать соответствующие изменения вибропараметров следует на интервалах различной длительности.

Для реализации указанного принципа предложено организовать накопление и анализ

вибрационных параметров в последовательных буферах, соответствующих различной временной длительности. Поэтому каждый буфер должен быть фиксированной длины, а после его заполнения и получения нового элемента следует удалять самый старый. Таким образом при каждом полном обновлении буфера может быть получена и передана в следующий буфер независимая оценка его параметров. Для минимизации объема хранимой информации целесообразно усреднять и прореживать результаты измерений вибрации при их последовательной передаче, что позволяет получить в каждом из буферов сравнимое число усредненных значений  $M$  и применять одинаковые методы анализа. Также важным свойством усреднения является сглаживание несущественных для конкретного временного интервала флуктуаций.

Помимо усредненных уровней  $M$ , согласно предложенному выше принципу, необходимо определять и накапливать интервалы их изменений  $K$ . Причем при получении такого нового элемента в буфер можно удалять самый старый (как и для  $M$ ) или самый малый. В процессе разработки алгоритма использовались различные способы нахождения  $K$ , наиболее простым и в тоже время эффективным является определение разницы между максимальным и минимальным значением по значениям  $M$  конкретного буфера в момент передачи данных в буфер большего временного интервала. Достоинством такого подхода является одинаковая оценка как скачкообразных, так и монотонных изменений.

Исходя из необходимости оценки относительного роста, базовое значение  $B$  должно выбираться на уровне нижней границы интервала изменений конкретного буфера, к примеру, как минимальное среднее по нескольким последовательным значениям. Причем применять данное базовое значение предлагается к предыдущему, меньшему по времени буферу для минимизации задержки, возникающей при сглаживании значений  $M$ . Исходя из вышесказанного, для построения порогов, с которыми сравниваются поступающие в каждый буфер значения  $M$  предлагается формула  $R_i^p = B_{i+1} + 2^{p-1} H_{i+2} + 0.5 H_{i+1}$ , в которой:  $R_i^p$  – порог для буфера с индексом  $i$  и степенью опасности  $p$  (1 – предупреждение, 2 – опасность и т.д.);  $B_i$  – базовое значение по буферу с индексом  $i$ ;  $H_i$  – оценка уровня типовых изменений по буферу с индексом  $i$ , которое соответствует среднему увеличенному на 3 СКО по интервалам изменений  $K$  в данном буфере. На основании сравнения величин  $M$  с пороговыми значениями определяются зоны их состояния, которые характеризуют степень опасности роста соответствующих параметров и используются при диагностировании.

Число буферов и параметры передачи данных целесообразно задавать таким образом, чтобы охватить наиболее типовые естественные изменения и разделить интервалы накопления на временные отрезки, отличающиеся более чем на порядок. Типовые временные длительности последовательных буферов – несколько минут, часов, суток, месяцев, лет с числом значений в каждом не более 120. Для обнаружения монотонного роста, который мог происходить с начала накопления

статистики, предлагается последний буфер реализовать в виде архива (без удаления данных) с использованием типовых порогов для стабильного вибрационного состояния с учетом стандартных рекомендаций по их завышению в условиях нестабильности.

В ходе тестирования программных модулей, реализующих предложенный метод, было подтверждено его преимущество по сравнению с стандартным методом, использующим закругление пороговых значений. Особенно значимый положительный результат получен при высоких скоростях деградации на фоне более медленных флуктуаций с высоким уровнем (пример – сигнал на рис. 1) и на трендах, включающих преобладающие случайные флуктуации. Вторая ситуация является характерной скорее для промышленных объектов, а результат достигается за счет снижения случайного разброса при усреднении и, соответственно, снижения порогов по мере увеличения длительности временных интервалов.

## 2. Прогнозирование изменения технического состояния

Также крайне важной задачей в процессе диагностирования является прогнозирование достижения определяемых пороговых значений в условиях, когда тренд вибрационных параметров имеет как случайные, так и монотонные разнонаправленные компоненты. Особенно важно определить момент с короткого начала деградации, для этого предлагается в каждом из рассмотренных выше накопителей определять точку изменения тенденции по следующему принципу. Производится определение аппроксимирующей функции  $\hat{y}$  на интервале  $\{y_{k-n+1}, y_k\}$  заданной начальной длины  $n$ , где  $y_k$  – последнее принятое в буфер значение параметра ( $M$ ),  $\sigma_n$  – СКО относительно  $\hat{y}$  значений  $\{y_{k-n+1}, y_k\}$ . Далее проверяется выполнение хотя бы одного из трех условий наличия точки изменения тенденции: 1 - значительное среднее отклонение значений  $\{y_{k-n+1}, y_k\}$  от значений  $\hat{y}$  по сравнению с  $\sigma_n$ , 2 - значительная относительная разница  $\sigma_n$  и СКО значений  $\{y_{k-n+1}, y_k\}$  относительно  $\hat{y}$ , 3 - наличие среди отклонений значений  $\{y_{k-n+1}, y_k\}$  от  $\hat{y}$  существенного по сравнению с  $\sigma_n$  скачка.

Указанные условия характеризуют наиболее часто наблюдаемые на практике признаки изменения тенденции: точка перегиба (разные тенденции слева и справа), изменение разброса (связанное с началом или окончанием действия одного из факторов), скачка (связанного с резким изменением влияющего фактора или появлением неисправности). Если ни одно из условий не выполнено, производится расширение интервала аппроксимации  $n=n+1$  и повторная проверка условий и т.д. пока точка изменения тенденции не будет найдена или не будет достигнуто начало буфера. Достоинство такого подхода очевидно, поскольку аппроксимация по всему рассматриваемому интервалу может дать существенную ошибку. Так на рис. 2(а) показан временной тренд СКЗ виброскорости в полосе 10-1000 Гц, на котором обнаруженная по условию №1 (перегиб) точка изменения тенденции  $Tu$  соответствует отрыву части зуба планетарного



редуктора с последующей ускоренной деградацией (выкрашивание металла). Из рисунка видно, что ошибка прогноза в момент  $T_p$  при аппроксимации на участке от  $T_u$  оказалась в пределах суток, а при аппроксимации всего рассматриваемого тренда – более 8 суток. Точный прогноз позволяет принять своевременные решения по управлению объектом и подготовке к его аварийному останову.

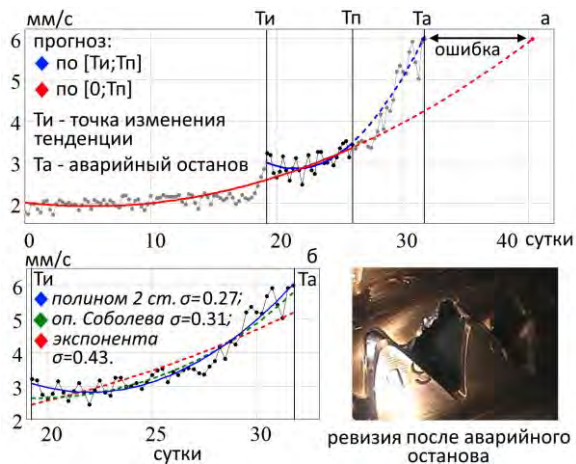


Рис. 2. Прогнозирование на временном тренде деградации зубчатого зацепления газотурбогенератора

Для прогнозирования по временному тренду могут использоваться различные аппроксимирующие функции и способы их определения. Вместе с этим полезно оценить - присутствует ли на рассматриваемом участке для аппроксимации тенденция к росту. Данная информация может быть важна для оператора и использоваться в качестве дополнительного критерия определения степени опасности. Для этого предлагается использовать полиномиальную аппроксимирующую функцию с ее разложением на ортогональные полиномы до 2-ой степени с помощью рекуррентного соотношения Форсайта [8]. Высшие степени полиномов использовать нецелесообразно исходя из того, что они отвечают за разнонаправленные тенденции, которые, очевидно, не должны учитываться.

Значимость коэффициентов при ортогональных полиномах можно оценить с помощью критерия Фишера. Значимость при полиноме 1-ой степени дает статистически обоснованный ответ - является ли существенной тенденция к росту, а значимость коэффициента 2-ой степени при незначимом коэффициенте 1-ой степени говорит о естественных изменениях, не связанных с деградацией.

Опыт применения различных известных в задачах прогнозирования функций показывает, что полином 2-ой степени дает, как правило, аналогичный или более точный результат аппроксимации нежели другие функции. Так на рис. 2(б) приведены значения среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  результатов измерений от линий тренда на участке от  $T_u$  до  $T_a$ , построенных в том числе с помощью экспоненты и операторов Соболева [9] (использованы I и L-операторы с кратностью интегралов 1, 2 и выбором лучшего результата).

### 3. Определение причин изменения технического состояния

Как правило диагностирование инициируется с заданной периодичностью или по событию. Появление и рост диагностических параметров - основной признак дефектов, который в соответствии с описанным выше методом адаптации пороговых значений может характеризоваться зонами состояния. Также важны сравнительные признаки, такие как превышение уровня одного параметра над другим, самый показательный пример - сравнение гармоник вибрации, кратных частоте вращения, для разделения таких дефектов как дисбаланс, несоосность соединяемых муфтой валов, задевание ротором статора. Наиболее простой и часто применимый принцип автоматического диагностирования - поузловой, который использует для определения дефектов узла исключительно измеренные в его точке параметры. Такой подход может приводить к существенным ошибкам постановки диагноза, особенно автоматического, в случае наличия развитого дефекта, когда вызванная им вибрация распространяется в точки измерения соседних узлов и даже машин. Также важно отметить, что такие типовые дефекты как несоосность валов, соединяемых муфтой, дисбаланс ротора, дефекты потока характеризуются ростом параметров в различных точках контроля (опорах вращения). Поэтому для повышения достоверности диагностирования необходимо использовать сравнительную оценку роста одних и тех же параметров вибрации в разнесенных в пространстве точках измерения, такой подход можно назвать пространственным.

При разработке алгоритмов автоматического диагностирования производители часто идут по пути конфигурации диагностических решающих правил в виде программного кода, отличающегося для различных типов машин. Главным недостатком такого подхода является трудоемкость разработки и коррекции диагностических программных модулей, требующих участия как программистов, так и диагностов. Это, как правило, требует привлечения производителя систем в случае необходимости коррекции или дополнения диагностического модуля. В качестве альтернативного подхода предлагается использование общего, инвариантного к типу объекта алгоритма диагностирования с конфигурацией решающих правил на уровне входных данных - с помощью пользовательского интерфейса с возможностью учета пространственного подхода. Для этого в процессе конфигурации предлагается формировать таблицу размером  $i \times j$ , где  $i$  - число диагностических признаков (число строк), а  $j$  - число точек контроля (число столбцов) путем внесения в ячейки составных элементов, каждый из которых включает номер дефекта из списка заданных, типа признака (основной или дополнительный) и коэффициента влияния от 0 до 1, определяющего относительный вклад данного признака в общую вероятность.

Основные - признаки, с большой долей вероятности указывающие на дефект, дополнительные - косвенные признаки, являющиеся скорее следствием возникновения дефекта. К примеру, при несоосности валов, соединяемых муфтой, основными признаками являются



параметры, характеризующие изменение формы колебаний валов (рост кратных частоте вращения гармоник), а дополнительными являются признаки, характеризующие повышенное трение при перегрузке подшипников (рост уровня фона узкополосного спектра). Важно отметить, что при таком подходе к конфигурации диагностический модуль это всего лишь одна таблица, хоть и довольно большая, типовая - примерно 50-100 параметров на 4-8 точек контроля вибрации.

Для каждого дефекта  $n$ , на основании сконфигурированной пользователем общей таблицы признаков, формируются две матрицы весовых коэффициентов – основных  $O(n)$  и дополнительных  $D(n)$  признаков. При иницировании процедуры диагностирования для каждого из рассмотренных выше буферов формируется матрица зон состояний  $Z$  (также  $i \times j$ ), в которую вносится степень опасности  $p$ . Процесс диагностирования реализуется путем оценки доли обнаруженных основных и дополнительных признаков для каждого дефекта, которые характеризуют предварительную вероятность конкретного дефекта  $P_{II}(n)$ , определяемую по следующей формуле:

$$P_{II}(n) = \frac{\mu + 1 - \varepsilon}{\mu + 1} \times \frac{\sum (Z^{(0,1)} \times O(n))}{\sum O(n)} + \frac{1}{\mu + 1} \times \frac{\sum (Z^{(0,1)} \times D(n))}{\sum D(n) + 1 - \varepsilon}$$

В приведенной формуле если  $\sum D(n) \neq 0$  (сумма элементов матрицы), то  $\varepsilon = 1$ , иначе  $\varepsilon = 0$ ,  $\mu$  - отношение вклада в вероятность основных и дополнительных признаков.  $Z^{(0,1)}$  - булева матрица, соответствующая  $Z$ , в которой элементы  $> 0$  приравниваются к 1. **Ошибка! Источник ссылки не найден.** Таким образом при наличии всех основных и дополнительных признаков вероятность дефекта соответствует единице. Упростить конфигурацию можно за счет разделения основных и дополнительных признаков по величине коэффициента влияния.

Далее производится уточнение вероятностей дефектов, для этого используются предварительно обнаруженные дефекты (с  $P_{II} > 0.5$ ). Для каждого такого дефекта с номером  $n$  определяется матрица  $S(n)$  в которой каждый элемент является максимумом по соответствующим элементам  $D(k)$  прочих предварительно обнаруженных дефектов ( $k \neq n$ ). Окончательная оценка вероятности идентификации каждого дефекта  $P_O$  производится по

формуле 
$$P_O(n) = P_{II}(n) - \frac{\sum (Z^{(0,1)} \times O(n) \times S(n))}{(\mu + 1) \sum O(n)}$$
 и

позволяет выделить наиболее вероятные дефекты с учетом пересечения пространств диагностических признаков. Необходимо отметить, что для корректной работы приведенного способа требуется описание полного перечня возможных состояний. Выходными данными при диагностировании, как правило, являются наиболее вероятный и опасный дефект, степень опасности и прогноз которых определяется зонами состояния и прогнозами по всей совокупности диагностических признаков, характеризующих рост параметров.

В процессе разработки метода диагностирования реализовывалась также возможность использования отрицательных весовых коэффициентов влияния без применения механизма нивелирования

вероятностей дефектов с частично совпадающими признаками. В этом случае для каждого дефекта необходима в том числе конфигурация признаков, понижающих вероятность его обнаружения, а описание полной совокупности возможных состояний и выделения типов признаков, напротив, не требуется. Данный вариант предполагает ввод гораздо большего объема данных, что усложняет конфигурацию и требует формирования отдельных таблиц для каждого дефекта.

Признаки, определяемые по сравнительной оценке параметров вибрации, измеренных в одной точке, могут быть использованы в рамках предложенного алгоритма путем конфигурации дополнительных разностных параметров и установки для них абсолютных пороговых значений. Помимо этого, целесообразно вводить комплексные признаки, позволяющие, к примеру, выявить максимальные зоны по заданному перечню параметров, что является необходимым при одинаковом влиянии на вероятность как нескольких, так и одного события.

В рамках предложенного метода диагностирования для исключения взаимовлияния близко расположенного судового оборудования, у которого могут совпадать или находиться близко характерные частоты дефектов, следует использовать повышенное частотное разрешение, специальные методы выявления и исключения «слившихся» гармонических компонент спектра, независимые признаки каждого дефекта, в том числе и по среднечастотной, и по высокочастотной вибрации (спектры огибающей), позволяющих отказаться от признака в низкочастотной вибрации.

Эффективность предложенного метода подтверждена в ходе диагностики роторного оборудования различного типа с использованием как стационарных, так и переносных систем.

### Закключение

Предложенный метод адаптации порогов, в отличие от стандартного подхода, решает задачу своевременного определения и прогнозирования изменения технического состояния в условиях естественных колебаний виброактивности, характерных для судовых машин. Предложенный метод диагностирования, в отличие от поузлового метода, позволяет учитывать пространственный подход, является инвариантным к типу объекта контроля и позволяет конфигурировать диагностические решающие правила в виде одной сводной таблицы, что значительно упрощает привязку систем к объектам контроля. Внедрение систем автоматической вибродиагностики с предложенными решениями на судах, помимо повышения надежности и безопасности эксплуатации ответственного роторного оборудования, позволит осуществлять сбор объективной детальной информации о характере и причинах изменения виброактивности и накапливать статистику по обнаруживаемым дефектам и их признакам, что в будущем позволит дальше развивать методы автоматической обработки вибродиагностических параметров и корректировать диагностические правила с учетом сложных судовых условий.

### Литература

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.7. В 2 кн. Кн. 2. Вибродиагностика / Ф. Я. Балицкий [и др.]. М.: Машиностроение, 2005. 829 с.
2. Жулин В.И., Абдулаев А.А. Анализ бортовых систем диагностирования корабельных машин и механизмов. Актуальные вопросы проектирования, постройки и эксплуатации морских судов и сооружений: труды региональной научно-практической конференции, Севастополь, 15-16 ноября 2017 г. / М-во образования и науки РФ; Севастопольский государственный университет; науч. ред. В.И. Истомин. Севастополь: СевГУ, 2018. с. 88 - 101.
3. Barkov A., Barkova N., Mitchell J.S. Condition assessment and life prediction of rolling element bearings - part 1 // Sound and Vibration. 1995. № 6. p. 10-17.
4. Barkova N. A., Barkov A. V., Fedorishchev V.V., Grishchenko D.V. Bearing diagnostics of slow speed industrial rotating equipment by shock pulses [электронный ресурс]. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 643. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/643/1/012026> (дата обращения: 17.01.2020).
5. Azovtsev A.Yu., Barkova N.A., Degterev S.G. Rolling stock vibration diagnostics experience on Russian railways. 10th European conference on non-destructive testing. Reports [Электронный ресурс] / The Russian society for non-destructive testing and technical diagnostics, European federation for non-destructive testing. Москва : PSNTTD, 2010. URL: [https://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1\\_08\\_15.pdf](https://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_08_15.pdf) (дата обращения: 17.01.2020).
6. ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы. М.: Стандартинформ, 2010. 43 с.
7. ГОСТ Р 55265.2-2012 (ИСО 10816-2:2009). Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 2. Стационарные паровые турбины и генераторы мощностью более 50 МВт с рабочими частотами вращения 1500, 1800, 3000 и 3600 мин(-1). М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
8. Худсон Д. Статистика для физиков : Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике. Москва : Мир, 1970. 296 с.
9. Равин А.А., Хруцкий О.В. Прогнозирование технического состояния оборудования. Deutschland, Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 141 с.

### References

1. Nerazrushayushchiy kontrol': Spravochnik: V 7 t. Pod obshch. red. V.V. Klyueva. T.7. V 2 kn. Kn. 2. Vibrodiagnostika / F. Ya. Balitskiy [i dr.]. M.: Mashinostroenie, 2005. 829 s.
2. Zhulin V.I., Abdulaev A.A. Analiz bortovykh sistem diagnostirovaniya korabel'nykh mashin i mekhanizmov. Aktual'nye voprosy proektirovaniya, postroyki i ekspluatatsii morskikh sudov i sooruzheniy: trudy regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sevastopol', 15-16 noyabrya 2017 g. / M-vo obrazovaniya i nauki RF; Sevastopol'skiy gosudarstvennyy universitet; nauch. red. V.I. Istomin. Sevastopol': SevGU, 2018. s. 88 - 101.
3. Barkov A., Barkova N., Mitchell J.S. Condition assessment and life prediction of rolling element bearings - part 1 // Sound and Vibration. 1995. № 6. p. 10-17.
4. Barkova N. A., Barkov A. V., Fedorishchev V.V., Grishchenko D.V. Bearing diagnostics of slow speed industrial rotating equipment by shock pulses [elektronnyy resurs]. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 643. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/643/1/012026> (data obrashcheniya: 17.01.2020).
5. Azovtsev A.Yu., Barkova N.A., Degterev S.G. Rolling stock vibration diagnostics experience on Russian railways. 10th European conference on non-destructive testing. Reports [Elektronnyy resurs] / The Russian society for non-destructive testing and technical diagnostics, European federation for non-destructive testing. Moskva : PSNTTD, 2010. URL: [https://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1\\_08\\_15.pdf](https://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_08_15.pdf) (data obrashcheniya: 17.01.2020).
6. GOST R ISO 13373-1-2009. Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin. Vibratsionnyy kontrol' sostoyaniya mashin. Chast' 1. Obshchie metody. M.: Standartinform, 2010. 43 s.
7. GOST R 55265.2-2012 (ISO 10816-2:2009). Vibratsiya. Kontrol' sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmereniy vibratsii na nevrashchayushchikhsya chastyakh. Chast' 2. Statsionarnye parovye turbiny i generatory moshchnost'yu bolee 50 MVt s rabochimi chastotami vrashcheniya 1500, 1800, 3000 i 3600 min(-1). M.: Standartinform, 2014. 20 s.
8. Khudson D. Statistika dlya fizikov : Lektsii po teorii veroyatnostey i elementarnoy statistike. Moskva : Mir, 1970. 296 s.
9. Ravin A.A., Khrutskiy O.V. Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya. Deutschland, Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 141 s.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Грищенко Дмитрий Вячеславович**, старший научный сотрудник, ООО «Ассоциация ВАСТ», 198207, Санкт-Петербург, пр. Стачек, 128, e-mail: gri\_dmi@mail.ru  
**Dmitry Grishchenko**, senior researcher, Association VAST LLC, 128 Stachek Ave., Saint Petersburg, 198207, e-mail: gri\_dmi@mail.ru

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

УДК 629.5:[015 + 085] (571.64)  
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.007

### Анализ особенностей колебаний пришвартованного судна при волнении

Д.П. Ковалев<sup>1</sup>, П.Д. Ковалев<sup>1</sup>, А.С. Борисов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск

**Аннотация** В работе рассмотрены особенности колебаний пришвартованного судна для основных портов Сахалинской области, поскольку качка судна у причала может представлять опасность и приводить к повреждению судна или швартовых линий. По данным натурных измерений морского волнения в портовых бухтах рассчитаны спектры колебаний уровня и определены периоды существующих в них волн для диапазона периодов от 2 с до 30 минут. Произведен расчет периодов собственных колебаний (качки) двух типов судов, преимущественно швартующихся в портах. С учетом полученных результатов выполнено моделирование движения судов при волнении как динамической с системы внешним возбуждающим воздействием на основе дифференциального уравнения второго порядка. Показано влияние коэффициента вязкого демпфирования и жесткости швартовых на реакцию динамической системы без удара о причал и для режима ударного осциллятора. Установлено, что в случае прихода в район порта Корсаков длинноволновой зыби движения судна могут переходить в хаотические.

**Ключевые слова:** волны, качка судна, динамическая система, фазовый портрет, ударный осциллятор.

### Analysis of moored ship oscillations in waves

Dmitry P. Kovalev<sup>1</sup>, Peter D. Kovalev<sup>1</sup>, Aleksander S. Borisov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of marine geology and geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk

**Abstract.** The paper considers the peculiarities of moored vessel oscillations for the main ports of the Sakhalin region, since the pitching of the vessel at the berth can be dangerous and lead to damages of the vessel or mooring lines. Spectra of sea level fluctuations and periods of waves in port bays were calculated using sea level fluctuation measurements obtained in the range from 2 seconds to 30 minutes. Calculations of resonance periods (pitching) of two types of vessels mainly moored in ports were done. Taking into consideration these results the simulation of the vessel movement in waves as a dynamic system with an external excitation was performed on the base of second-order differential equation. The influence of viscous damping coefficient and mooring stiffness on the response of the dynamic system is shown for two cases: for system without impact and for the impact oscillator mode. It is established that in the event of a long-wave swell coming to the Korsakov port area, the vessel's movements may become chaotic.

**Key words:** waves, ship rolling, dynamic system, phase projection, impact oscillator.

#### Введение

В статьях и книгах по устройству и эксплуатации судов, как например, [1 – 3] большое внимание уделяется мореходности судов и, в частности, при воздействии качки. Качка судна особенно опасна при близких значениях собственных колебаний судна и приходящих морских волн. И если судно не обладает достаточной динамической остойчивостью, то это может привести к потере остойчивости и опрокидыванию судна.

Качка пришвартованного судна под воздействием приходящих морских волн в некоторых случаях может приводить к обрыву швартовых или повреждению корпуса судна о причал даже при наличии демпферов. Поэтому повсеместно проводится анализ существующих динамических систем швартовки численными моделями [4 – 5], в которых нелинейности аппроксимируются и частично описываются их линеаризованным или квазистатическим представлением.

В системах швартовки судна к монолитному причалу также могут возникнуть нелинейные колебания, когда судно ударяется об упор и потом отскакивает от него натягивая швартовые. Возникает динамическая система с так называемым ударным осциллятором, при котором компоненты колебательной системы сталкиваются с жестким

концевым упором или друг с другом. Такие осцилляторы широко используются в разных моделях [6 – 9].

Общая цель представленных здесь результатов исследований – изучение откликов швартовых систем, подвергающихся возбуждению, индуцируемому детерминированным океанскими волнами. Рассмотрены конкретные случаи динамики швартовых в основных портах Сахалинской области, поскольку причальные сооружения, суда и возбуждающее морское волнение имеют отличие в параметрах от рассмотренных в работах [5, 9, 10].

#### 1. Экспериментальные данные

Для изучения условий швартовки и колебаний судна необходимо знать периоды воздействующих на судно морских волн и собственные периоды колебаний судна на морской поверхности. Определение периодов волн производилось с использованием спектров колебаний уровня в двух основных портовых бухтах о. Сахалин – городов Холмск и Корсаков. Карта района с пунктами наблюдений за волнением приведена на рисунке 1.



Рис. 1. Карта района с пунктами наблюдений за волнением

Спектры рассчитывались по полученным в 2008 – 2009 г. записям колебаний уровня моря с секундной дискретностью [11], регистрируемых автономными регистраторами волнения АРВ-14. Приборы устанавливались в портовых бухтах, что позволило определить периоды их собственных, резонансных колебаний. Рассчитанные по четырем суточным временным рядам спектры приведены на рисунке 2, а периоды пиков сведены в таблицу 1.

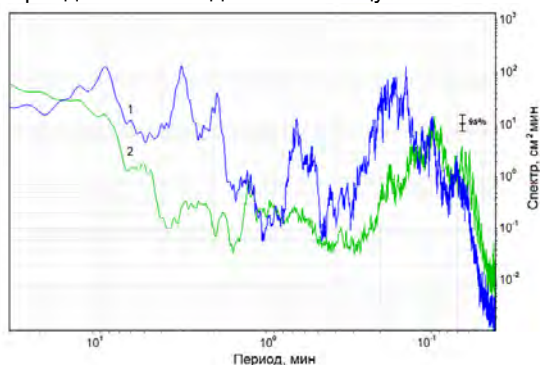


Рис. 2. Спектры колебаний уровня для трех пунктов наблюдения: 1- Холмск, 2 - Корсаков

Для рассматриваемой в дальнейшем модели швартовки необходимо знать периоды собственных колебаний судов на поверхности моря, что по морской терминологии называется качкой. Были отобраны типичные суда, швартующиеся в рассматриваемых портах. Для порта Холмск – паром «Сахалин-8», один из семейства трех аналогичных судов, работающих на линии Ванино-Холмск. Для порта Корсаков, в котором обычно обрабатываются суда водоизмещением до 5000 тонн, был выбран теплоход «Игорь Фархутдинов», осуществляющий пассажирские перевозки на линии Корсаков - южные Курильские острова.

Собственные периоды - качки судов, с учетом допущений и упрощения формул, определяются по следующим выражениям [3]:

$$T_{\theta} = cB/\sqrt{h}, \quad (1)$$

$$T_{\psi} \approx T_{\zeta} \approx 2,4\sqrt{d}, \quad (2)$$

где  $B$  – ширина судна,  $d$  – осадка судна,  $c$  – инерционный коэффициент судна, обычно лежит в пределах 0,74 – 0,8 с/м<sup>1/2</sup> [1],  $h$  – метacentрическая высота судна. Выражение (1) используется для вычисления периода бортовой качки, а (2) – для килевой и вертикальной. Основные параметры судов, а также периоды качки, рассчитанные с использованием (1) и (2), приведены в таблице 2.

Таблица 1

Периоды волн в акваториях Корсакова и Холмска

Периоды волн в Корсакове, T (с)					
3	4,9	6,5	13,8	22,4	75,3
107,1	132,4	–	–	–	–
Периоды волн в Холмске, T (с)					
5,4	8,5	11,6	13,7	15,8	21,1
25,7	31,2	39,6	114,8	184	480

Интерес представляет рассмотрение модели динамической системы, в которой приходящие морские волны раскачивают судно при бортовой качке, так как реальное морское волнение является нерегулярным и его можно рассматривать как стационарный случайный процесс [3], а наиболее опасна именно бортовая качка, когда периоды приходящих морских волн близки к собственным периодам бортовой качки судна.

## 2. Математическая модель

В работах [4, 5, 9, 12] и в статьях других авторов для описания колебания закоренного или стоящего у причала судна как правило используется дифференциальное уравнение второго порядка с внешним возбуждающим воздействием.

Следует заметить, что авторы настоящей работы проверяли еще вариант с моделированием уравнения Дуффинга [10, 13] и пришли к выводу, что в данном случае предпочтительнее использовать линеаризованную модель, как поступают многие другие исследователи, указанные выше, а также рассматривающие ударный режим [6, 8].

Существуют еще работы отечественных исследователей [14, 15], в которых рассмотрен другой подход к рассматриваемой проблеме.

В нем судно схематизировано цилиндрическим телом неограниченной протяженности прямоугольного поперечного сечения, а набегающие из бесконечности волны описываются потенциалом скорости. Данный подход представляется интересным, и авторы настоящей статьи собираются его использовать в дальнейшей работе.

Ниже рассмотрим модель, описывающую динамику диссипативного осциллятора массой  $m$ , с коэффициентом вязкого демпфирования (параметром диссипации)  $c$ , амплитудой внешнего воздействия  $F_0$ , частотой внешнего воздействия  $\omega$  (периодом  $T$ ), жесткостью  $k_1$  для положительного смещения судна и жесткостью  $k_2$  – для отрицательного.



Таблица 2

Основные параметры рассматриваемых судов и порты их швартовки

Тип судна	Ширина по ватерлинии/Длина (м)	Метацентрическая высота (м)		Периоды боковой качки судна (с)		Водоизмещение (т)	Дедвейт (т)	Осадка, (м)	T <sub>ш</sub> (с)	Порт швартовки
		h min	h max	T <sub>θ</sub> min	T <sub>θ</sub> max					
"Сахалин - 8" паром	20,08/127,3	0,4	1,5	13,1	25,4	8530	2400	6,6	6,2	Холмск
"Игорь Фархутдинов", теплоход	17,2/89,98	1	1,8	10,3	13,8	3962	815	5,3	5,5	Корсаков

Такой осциллятор в зарубежной литературе часто называют «билинейный осциллятор», так как эта динамическая система перемещается с различными жесткостями для положительных и отрицательных отклонений. Для описания такой системы воспользуемся уравнением гармонического осциллятора с затуханием, находящегося под воздействием внешней гармонической силы – морского волнения. По аналогии с [9] такое уравнение запишем в виде:

$$m\ddot{x} + 2c\dot{x} + px = F_0 \sin \omega t \quad (3)$$

при  $p = k_1$  для  $x > 0$   
 $p = k_2$  для  $x < 0$

здесь  $x(t)$  – переменная, описывающая состояние системы и являющаяся обобщенной координатой перемещения. Дифференцирование производится по  $t$ .

Уравнение (3) используется здесь для описания колебаний судна удерживаемого двумя разнонаправленными швартовными линиями с жесткостью  $k_1$  и  $k_2$ . В пределе, когда  $\alpha = k_2/k_1$  становится бесконечным, получается "ударный осциллятор" [4], т.е. когда судно будет ударяться об отбойники (кранцы, демпферы) причала. Это происходит, когда суда швартуются в гаванях против жестких кранцев. Общая жесткость этих кранцев, против бокового движения, может быть в 1000 раз больше жесткости швартовых линий [16]. Периодический ударный резонанс для моментов описываемых уравнением (3) возникает при частоте возбуждения  $\omega = 2\omega_0$ , где  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$  частота собственных колебаний судна [6].

С целью обеспечения возможности вариаций частоты колебаний судна при моделировании воспользуемся тем, что  $p/m = k/m = \omega^2_0$ . Также, для упрощения алгоритма программы моделирования

понижаем порядок уравнения (3) с использованием задачи Коши [17]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -2\frac{c}{m}x_2 - \omega_0^2 x_1 + \frac{F_0}{m} \sin \omega t \end{aligned} \quad (4)$$

$p = k_1$  для  $x > 0$   
 $p = k_2$  для  $x < 0$

Для предложенной системы уравнений была составлена программа вычисления зависимости  $x(t)$  и фазового портрета динамической системы, описываемой (4). При этом изменение скорости для случая удара о демпферы моделируется как  $\dot{x}(t+) = -r\dot{x}(t-)$ , где  $r$  – коэффициент реституции,  $(t+)$  – время после удара и  $(t-)$  – время до удара.

### 3. Анализ и обсуждение результатов

Анализ начнем с порта г. Холмск для парома «Сахалин-8». Фазовый портрет такой динамической системы для случая швартовки судна без удара в причал при одинаковой жесткости швартовых, нормированном коэффициенте вязкого демпфирования  $c/m = 0,005$ , реально наблюдаемом волнении моря с периодом  $T = 25,7$  с, периодом качки самого судна  $T_0 = 25,4$  с и нормированной амплитудой воздействия волнения  $F_0/m = 1$  показан на рисунке 3а. Ввиду близости периодов колебаний здесь следует ожидать резонанса для режима колебаний системы без удара [18].

Видно, после прихода волн, колебания динамической системы без удара о демпферы постепенно приходят к предельному циклу. Такой процесс установления колебаний характерен для динамической системы, описываемой дифференциальным уравнением второго порядка и время установления  $t \sim c/m^{-1}$  [18].

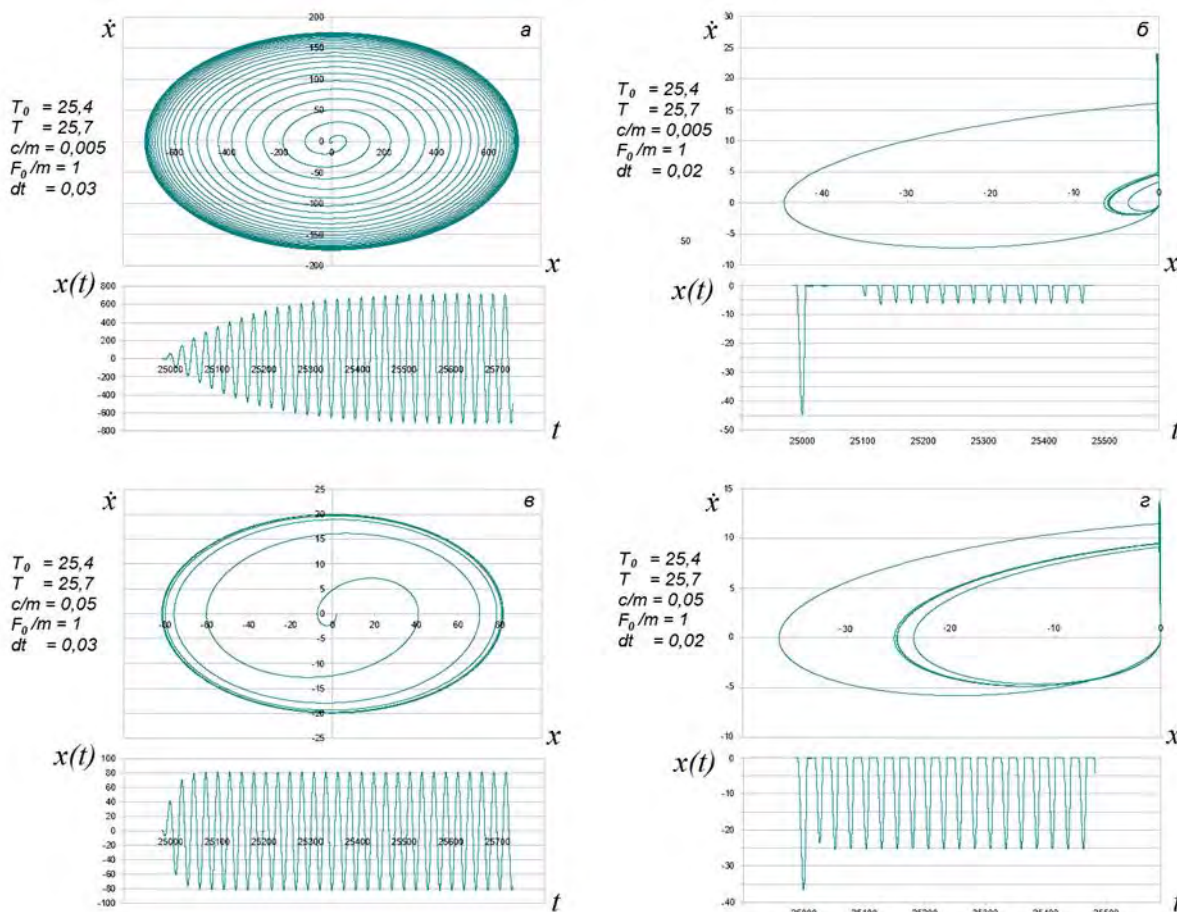


Рис. 3. Фазовые портреты и форма колебаний динамической системы в порту Холмск для случая без удара (а, в) и для ударного осциллятора (б, г) при воздействии морских волн с периодом 25,7 с и качке судна с периодом 25,4 с. Значения периодов колебаний и шага интегрирования  $dt$  приведены в секундах

Для случая режима ударных колебаний, вид фазового портрета существенно изменяется (рис. 3. б). Вначале наблюдается отскок большой амплитуды и удар о демпферы, потом прилипание и отскок от демпфера меньшей амплитуды, удар, затем отскоки и удары немного большей амплитуды с постепенным переходом к предельному циклу. И в этом случае, как следует из формы колебаний системы и фазового портрета, колебания динамической системы ударного осциллятора нелинейны.

При уменьшении амплитуды волнения до  $F_0/m = 0,1$  характер колебаний существенно не изменяется для обоих режимов динамической системы, за исключением уменьшения амплитуды ее колебаний.

Увеличение коэффициента вязкого демпфирования до  $c/m = 0,05$  показывает (рис. 3 в), что в безударном режиме наблюдается более быстрый переход системы к колебаниям по предельному циклу, чего и следовало ожидать. Для режима ударного осциллятора (рис. 3 г) в системе наблюдается отскок и удар несколько большей амплитуды, чем последующие и затем переход колебаний к предельному циклу.

Поскольку, как показано в [4, 6], периодический ударный резонанс для моментов, описываемых уравнениями (4), возникает при частоте возбуждения  $\omega = 2 \omega_0$ , авторами был выполнен расчет фазовых портретов системы для волнения моря с периодами около 12,7 с и периодами качки самого судна 25,4 с, амплитудой волнения  $F_0/m = 1$  и коэффициентами вязкого демпфирования  $c/m = 0,005$  и  $c/m = 0,5$ . Фазовые портреты для этого случая приведены на рис. 4.

По графику колебаний динамической системы (рис.4 а) с  $c/m = 0,005$  видно, что морские волны существенно более короткими периодами, отличающимися в два раза, «затягивают» периоды колебаний судна и в результате система начинает колебаться с периодом морских волн. Фазовый портрет для безударного режима колебаний показывает удвоение колебаний и при этом стремится к предельному циклу. Также видно, что амплитуды колебаний системы в этом случае примерно на полтора порядка меньше по сравнению с приведенными для случая на рис. 3 а.

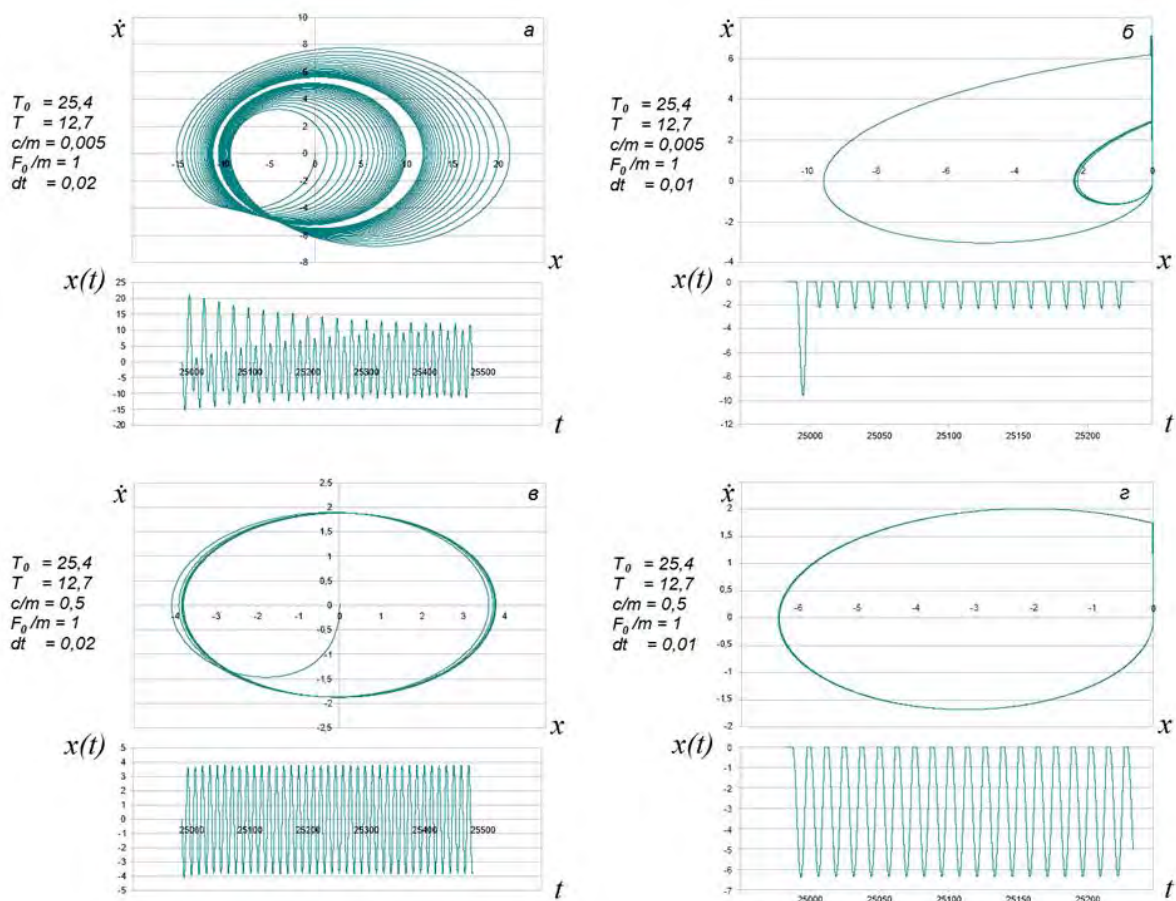


Рис. 4. Фазовые портреты и форма колебаний динамической системы в порту Холмск для случая без удара (а, в) и для ударного осциллятора (б, г) при волнении с периодом 12,7 с, периодом качки судна 25,4 с, амплитудой волнения  $F_0/m = 1$  для разных значений коэффициентов вязкого демпфирования  $c/m = 0,005$  и  $c/m = 0,5$  и шаге интегрирования  $dt$  в секундах

Для режима ударного осциллятора (рис. 4 б) на фазовом портрете первоначально наблюдается сильный отскок, удар, затем отскок и удар меньшей амплитуды и далее такие же по величине отскоки и удары, картина близкая к выше рассмотренному случаю (рис. 3 б), но амплитуда отскока в 2,5 раза меньше.

При очень значительном увеличении коэффициента вязкого демпфирования по сравнению с предыдущим случаем, до  $c/m = 0,5$  картина изменяется (рис.4 в). Колебания системы сразу происходят на периодах морских волн. И на фазовом портрете ударного режима наблюдаются отскоки и удары с амплитудой, которая не изменяется со времени.

Следует отметить, что периодический ударный резонанс при частоте возбуждения  $\omega = 2\omega_0$  рассмотрен выше условно, поскольку в Холмской бухте волнение с такими периодами не наблюдается (таб. 1). В то же время имеются волны с близкими периодами – 11,6 и 13,7 с. Но поскольку значимых отличий в фазовых портретах для разных периодов колебаний не наблюдается, то и на этих периодах не следует ожидать каких-либо существенных отличий, что и было подтверждено проверочным расчетом. Использование при расчете фазовых портретов и формы колебаний разных шагов интегрирования  $dt$

обусловлено лучшим отображением изменения формы колебаний динамической системы.

Также был проведен анализ перемещений судна для случая воздействия на него длинных волн. При периодах волн, превышающих периоды собственных колебаний судна примерно в два раза, фазовый портрет представляет квазипериодический тор с разрывом, характерный для бифуркации Хопфа при хаотическом поведении модели в нерезонансных и слабых резонансных случаях [8]. Такой случай будет рассмотрен ниже на примере теплохода «Игорь Фархутдинов».

Анализ воздействия волн с минутными периодами, являющимися модами собственных колебаний Холмской бухты (рис. 5), показал, что для периодов волн 3,1 и 8 мин фазовые портреты для случая безударных колебаний динамической системы близки по виду к тору без разрыва, а ударного осциллятора похожи и, в отличие от ранее рассмотренных, представляют движения вдоль оси  $x$  без значительных скоростей, т.е. судно будет двигаться практически перпендикулярно к причалу без перемещений вдоль него и движение судна в этом режиме состоит из группы трех затухающих отскоков и ударов, которые повторяются при приходе следующего возбуждающего воздействия.



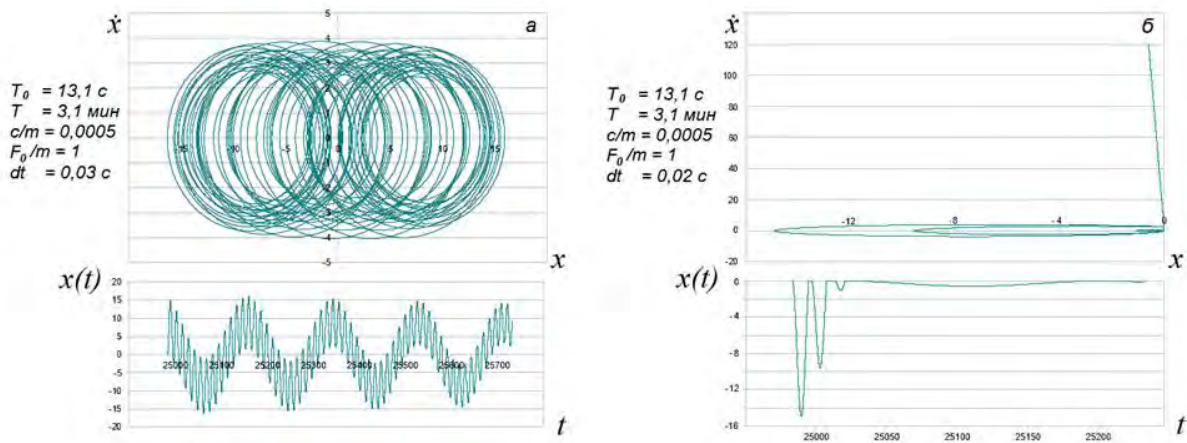


Рис. 5. Фазовые портреты и форма колебаний динамической системы в порту Холмск для случая без удара (а) и для ударного осциллятора (б)

Рассмотрим ситуацию в порту г. Корсаков с судном меньшего водоизмещения, теплоходом "Игорь Фархутдинов". Максимально возможные периоды боковой качки у него 13,8 с и почти равны периодам волн 13,7 с в порту Корсаков. Рассчитанные фазовые портреты и форма колебаний динамической системы для этого случая без удара и для ударного осциллятора оказались почти подобны приведенным на рис. 3 для парома «Сахалин 8». Поэтому рассмотрим ситуацию, когда возможен периодический ударный резонанс при частоте возбуждения  $\omega = 2\omega_0$ . Фазовые портреты и форма колебаний для этой ситуации представлены на рис. 6 а, б.

Как следует из фазового портрета и формы колебаний (рис.6 а) и сравнения с аналогичными (рис.4 а) для судна существенно большего водоизмещения, теплоход «Игорь Фархутдинов» при безударных о причал колебаниях будет раскачиваться на волнении и предельный цикл колебаний динамической системы в этом случае не четко выражен. В случае режима ударного осциллятора (рис. 6 б) вначале наблюдается отскок и затем удар с последующим дребезгом (выделен фрагментом на рис. 6 б, после чего происходит некоторое непродолжительное возрастание по амплитуде отскоков и ударов с переходом к предельному циклу.

Представляет интерес определение зависимости параметров колебаний системы от жесткости швартовых канатов. Поскольку жесткость, нормированная к массе  $p/m = k/m = \omega^2_0$ , то изменение  $\omega^2_0$  эквивалентно изменению жесткости. В соответствии с этим были рассчитаны фазовые портреты для периода волнения  $T = 6,5$  с и разных значений  $T_0$ . В случае безударных колебаний системы фазовые портреты существенно не отличались от приведенного на рис. 6 а, за исключением более четко выраженного режима удвоения колебаний.

Для режима ударного осциллятора увеличение жесткости швартовых линий ( $T_0 = 18$  с) приводит к увеличению амплитуды повторных ударов (рис. 6 в), а уменьшение жесткости ( $T_0 = 9,6$  с) уменьшает амплитуду ударов почти в 2 раза в рассматриваемом случае и увеличивает амплитуду дребезга (рис. 6 г). Отсюда следует, что необходимо снижать жесткость швартовых. Однако предел снижения требует отдельного изучения. Так, при  $T_0 < 6,5$  с уменьшения амплитуды первого и последующих отскоков и ударов не происходит, но увеличивается амплитуда дребезга.

Также было выполнено моделирование динамической системы для ситуаций, когда периоды волнения примерно в два раза больше, чем периоды колебаний судна. Для моделирования использовались период волн 22,4 с и судна 10,3 с. Рассчитанные фазовый портрет и отображения Пуанкаре (рис. 7) соответствуют бифуркации Хопфа для хаотического движения в нерезонансных и слабых резонансных системах [8], при которой фазовый портрет представляет квазипериодический тор и квазипериодический тор с разрывом, который и приведен на рис 7 а.

Отметим, что бифуркацией Хопфа называется переход от неустойчивой точки к устойчивому предельному циклу. Такое рождение колебаний является мягким, поскольку происходит при малых значениях параметров амплитуды волнения и вязкости и предельный цикл имеет очень малую амплитуду колебаний. В то же время малые возмущения могут привести к большим эффектам. Когда значение  $T$  смещается все дальше от значения бифуркации Хопфа, инвариантный круг в проекционных сечениях Пуанкаре заметно расширяется и попадает в периодический аттрактор более высокого периода. Впоследствии система становится нестабильной и хаотичной [8].



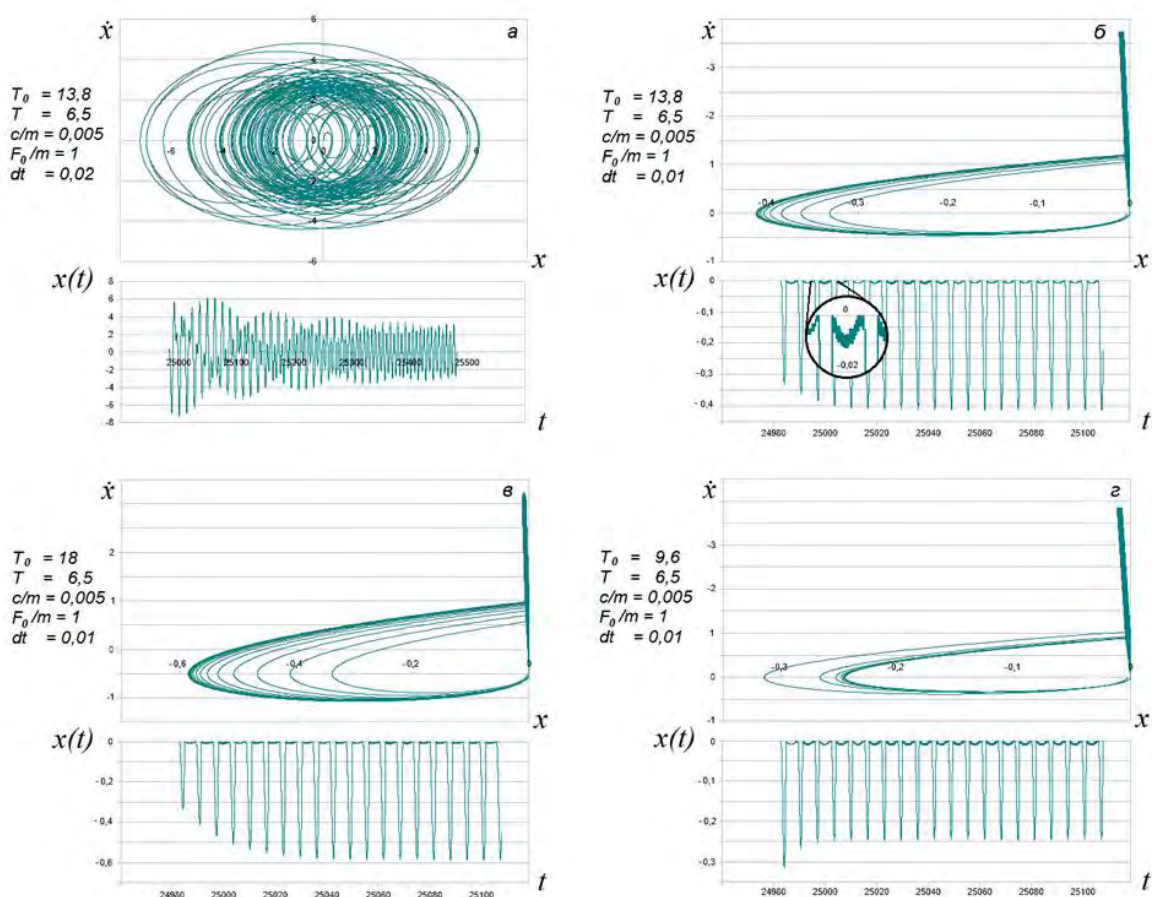


Рис. 6. Фазовые портреты и форма колебаний динамической системы в порту Корсаков для случая без удара (а) и для ударного осциллятора (в, б, г). Значения периодов колебаний и шага интегрирования  $dt$  приведены в секундах

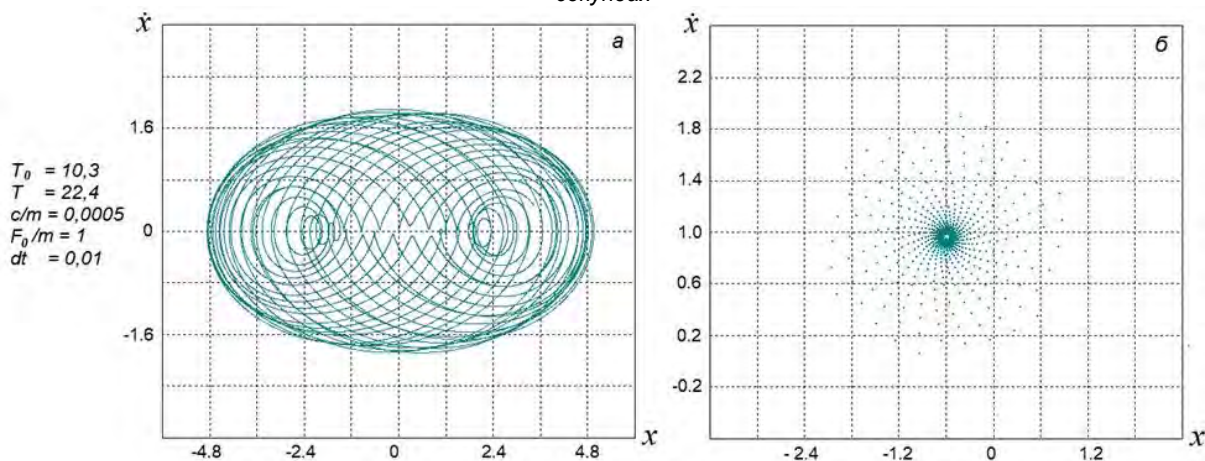


Рис. 7. Фазовый портрет динамической системы (а) и отображение Пуанкаре в порту Корсаков для периода волнения 22,4 с и периода собственных колебаний судна 10,3 с.

### Заключение

С использованием натуральных данных по волнению, полученных в портовых бухтах, определены периоды существующих там волновых процессов для диапазона периодов от 2 с до 30 минут. Показано, что собственные колебания портовых бухт имеют очень широкий диапазон периодов и характерные периоды волн для

Холмского порта лежат в пределах от 5,4 до 480 с, а порта в Корсакове – от 3 до 132,4 с.

С учетом существующих методов выполнен расчет собственных периодов качки судов двух разных типов и тоннажа, преимущественно швартующихся в портах: парома «Сахалин-8» в порту г. Холмск и теплохода «Игорь Фархутдинов» в порту Корсаков. Показано, что бортовая качка является наиболее опасной для пришвартованных судов.

Полученные данные о периодах волнения в портовых бухтах и периодах качки судов позволили выполнить моделирование движения судов при волнении – колебаний динамической системы для случаев удара судна о демпферы и без удара. Моделирование осуществлялось с использованием дифференциального уравнения второго порядка с внешним возбуждающим воздействием. Для численного моделирования выполнено понижения порядка уравнения с использованием задачи Коши.

Рассчитанные фазовые портреты и формы колебаний динамической системы в порту Холмск для разных коэффициентов вязкого демпфирования, реально наблюдаемого волнения моря с периодами около 25,7 с и периодов качки самого судна 25,4 с показали, что после прихода волн в случае движения судна без удара о демпферы колебания динамической системы постепенно приходят к предельному циклу. Для режима ударных колебаний вначале наблюдается сильный отскок и удар о демпфер, затем непродолжительное прилипание и далее следуют отскоки и удары меньшей амплитуды.

При уменьшении амплитуды волнения характер колебаний существенно не изменяется для обоих режимов динамической системы, за исключением уменьшения амплитуды ее колебаний. Увеличение коэффициента вязкого демпфирования в безударном режиме приводит к более быстрому переходу системы к колебаниям по предельному циклу, а в режиме ударного осциллятора в системе наблюдаются отскок и удар несколько большей амплитуды, чем последующие.

Выполнена проверка возможности перехода динамической системы к периодическому ударному резонансу при периодах возбуждения в два раза меньших периодов качки, предсказанному в [4, 6]. Установлено, что в этом случае морские волны с более короткими, отличающимися в два раза, периодами «затягивают» периоды колебаний судна и в результате система начинает колебаться с периодом приходящих волн.

Анализ воздействия более длинных волн с периодами 3,1 и 8 мин, являющимися модами

собственных колебаний Холмской бухты показал, что для случая ударного осциллятора, в отличие от ранее рассмотренных, судно будет двигаться практически перпендикулярно к причалу без перемещений вдоль него.

Моделирование колебаний для судна меньшего водоизмещения – теплохода "Игорь Фархутдинов" в порту Корсаков для периодов волнения меньших, чем периоды качки судна показало, что фазовые портреты и форма колебаний динамической системы для случаев без удара и для ударного осциллятора оказались почти подобными, как и для парома «Сахалин 8».

Анализ зависимости параметров колебаний системы от жесткости швартовых канатов показал, что для случая безударных колебаний характер колебаний существенно не изменяется при изменении жесткости. Для режима ударного осциллятора увеличение жесткости швартовых линий приводит к увеличению амплитуды повторных ударов.

Моделирование динамической системы для ситуаций, когда периоды волнения больше периодов колебаний судна более чем в два раза показало, что фазовый портрет представляет квазипериодический тор с разрывом и отображения Пуанкаре соответствуют бифуркации Хопфа для хаотического движения в нерезонансных и слабых резонансных системах. Увеличение периодов волнения дальше от значения бифуркации Хопфа, может привести к неустойчивости и хаотичным движениям динамической системы.

Моделирование подтвердило богатую динамику выше рассмотренных динамических систем. В режиме ударного осциллятора наблюдаются нелинейные колебания динамической системы. Важную роль в динамике системы играет параметр демпфирования, а также соотношение периодов внешнего возбуждения – морских волн и периодов собственных колебаний судна. При этом, даже при малых значениях параметров амплитуды волнения и вязкости, малые возмущения могут привести к большим эффектам.

#### Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМГиГ ДВО РАН.

#### Литература

1. Чайников К.Н. Общее устройство судов. Издательство «СУДОСТРОЕНИЕ» – Ленинград 1971. – 207 с.
2. Ситченко Н.К., Ситченко Л.С. Общее устройство судов – Л.: Судостроение, 1987. – 322 с.
3. Жинкин В.Б. Теория и устройство корабля. – С-Пб, Судостроение, 2002. – 336 с.
4. Thompson J.M.T., Ghaffari R. Chaotic dynamics of an impact oscillator // Phys. Rev. 1983. – A.27 – P. 1741-1743.
5. Thompson J.M.T., Stewart H.B. Nonlinear Dynamics and Chaos // John Wiley and sons, LTD. 2nd ed. 2002, 437 p.
6. Lee June-Yule. Motion behavior of impact oscillator // Journal of Marine Science and Technology, 2005. – Vol. 13. – No. 2. – P. 89 – 96
7. Fang W., Wickert J.A. Response of a periodically driven impact oscillator // J. of Sound and Vibration, 1994. – V. 170 (3) – P.397-409.
8. Cheng J., Xui H. Nonlinear dynamic characteristics of a vibro-impact system under harmonic excitation // Journal of mechanics of materials and structures, 2006. – Vol. 1. – No. 2. – P. 239 – 258. <http://dx.doi.org/10.2140/jomms.2006.1.239>
9. Thompson J.M.T. Complex dynamics of Compliant Offshore Structures // P. Roy. Soc. A–Math. Phys., 1983. – Vol. 387. – pp. 407-427.
10. Gottlieb O. Nonlinear oscillations, bifurcations and chaos in ocean mooring systems // A thesis submitted to Oregon State University 1991 in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy Completed December 3, 1991 Commencement June 1992. – 157 p.

11. Ковалев Д.П. Программа для ЭВМ Кума. // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Свидетельство 2018618778 от 19.07.2018
12. Thompson J.M.T., Bokaian A.R., Ghaffari R. Subharmonic resonances and chaotic motions of bilinear oscillator // IMA J. Appl. Math., 1983. 31, P. 207-234.
13. Van Oortmerssen G. The motions of a moored ship in waves // Publication No. 510. Netherlands ship model basin wageningen, 1976. The Netherlands. 138 p.
14. Леонтьев В.А., Нуднер И.С., Семенов К.К. Взаимодействие морских волн с судном, раскрепленным у причала // Conference Paper, MIT 2013 – P. 368 – 396.
15. Семенов К.К., Леонтьев В.А., Нуднер И.С. Воздействие морских волн на судно, ошвартованное у причала с камерой гашения // Magazine of Civil Engineering, 2015. – No.3 – С. 57 – 66.
16. Russel R.C.H. A Study of the Movement of Moored Ships Subjected to Wave Action // Proceedings of the Institute of Civil Engineers, 1959. – Vol. 12. – P.379-398.
17. Бугров Я.С. Высшая математика. Дифференциальные уравнения. Кратные интегралы. Ряды. Функции комплексного переменного / Бугров Я.С., Никольский С.М. – М.: Дофа, 2004. – Т.3. – 512 с.
18. Ловецкий К.П., Севастьянов Л.А. Учебно-методическое пособие по курсу «Математическое моделирование». Часть 1 Осциллятор – М.: Изд-во РУДН, 2007. – 63 с.

#### References

1. Chaynikov K.N. Obshchee ustroystvo sudov. Izdatel'stvo «SUDOSTROENIE», Leningrad 1971, 207 s.
2. Sitchenko N.K., Sitchenko L.S. Obshchee ustroystvo sudov. L.: Sudostroenie, 1987, 322 s.
3. Zhinkin V.B. Teoriya i ustroystvo korabya. S-Pb, Sudostroenie 2002, 336 s.
4. Thompson J.M.T., Ghaffari R. Chaotic dynamics of an impact oscillator // Phys. Rev. 1983. – A.27 – P. 1741-1743.
5. Thompson J.M.T., Stewart H.B. Nonlinear Dynamics and Chaos // John Wiley and sons, LTD. 2nd ed. 2002, 437 p.
6. Lee June-Yule. Motion behavior of impact oscillator // Journal of Marine Science and Technology, 2005. – Vol. 13. – No. 2. – P. 89 – 96
7. Fang W., Wickert J.A. Response of a periodically driven impact oscillator // J. of Sound and Vibration, 1994. – V. 170 (3) – P.397-409.
8. Cheng J., Xui H. Nonlinear dynamic characteristics of a vibro-impact system under harmonic excitation // Journal of mechanics of materials and structures, 2006. – Vol. 1. – No. 2. – P. 239 – 258. <http://dx.doi.org/10.2140/jomms.2006.1.239>
9. Thompson J.M.T. Complex dynamics of Compliant Offshore Structures // P. Roy. Soc. A–Math. Phy., 1983. – Vol. 387. – pp. 407-427.
10. Gottlieb O. Nonlinear oscillations, bifurcations and chaos in ocean mooring systems // A thesis submitted to Oregon State University 1991 in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy Completed December 3, 1991 Commencement June 1992. – 157 p.
11. Kovalev D.P. Programma dlya EVM Kuma. [PC software Kuma] Federal'naya sluzhba po intellektual'noy sobstvennosti. Svidetel'stvo 2018618778 ot 19.07.2018
12. Thompson J.M.T., Bokaian A.R., Ghaffari R. Subharmonic resonances and chaotic motions of bilinear oscillator // IMA J. Appl. Math., 1983. 31, P. 207-234.
13. Van Oortmerssen G. The motions of a moored ship in waves // Publication No. 510. Netherlands ship model basin wageningen, 1976. The Netherlands. 138 p.
14. Leont'ev V.A., Nudner I.S., Semenov K.K. Vzaimodeystvie morskikh voln s sudnom, raskreplennym u prichala. Conference Paper. MIT 2013. P. 368 – 396.
15. Semenov K.K., Leont'ev V.A., Nudner I.S. Vozdeystvie morskikh voln na sudno, oshvartovannoe u prichala s kameroy gasheniya. Magazine of Civil Engineering, No.3, 2015. S. 57 - 66.
16. Russel R.C.H. A Study of the Movement of Moored Ships Subjected to Wave Action // Proceedings of the Institute of Civil Engineers, 1959. – Vol. 12. – P.379-398.
17. Bugrov Ya.S., Nikol'skiy S.M. Vysshaya matematika. Differentsial'nye uravneniya. Kratnye integraly. Ryady. Funktsii kompleksnogo peremennogo. M.: Dofa. 2004. T. 3. 512 s.
18. Lovetskiy K.P., Sevast'yanov L. A. Uchebno-metodicheskoe posobie po kursu «Matematicheskoe modelirovanie». Chast' 1- Ostsillyator. M.: Izd-vo RUDN, 2007. 63 s.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Дмитрий Петрович Ковалев**, доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории волновой динамики и прибрежных течений Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, г.Южно-Сахалинск, ул. Науки 1б, e-mail: [d.kovalev@imgg.ru](mailto:d.kovalev@imgg.ru)

**Петр Дмитриевич Ковалев**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, г.Южно-Сахалинск, ул. Науки 1б, e-mail: [p.kovalev@imgg.ru](mailto:p.kovalev@imgg.ru)

**Александр Сергеевич Борисов**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, г.Южно-Сахалинск, ул. Науки 1б, e-mail: [a.borisov@imgg.ru](mailto:a.borisov@imgg.ru)

**Dmitry P. Kovalev**, Dr. Sci. (Phys & Math), Head of the Laboratory of wave dynamics and coastal currents, Institute of marine geology and geophysics, Nauki st., 1b, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russian Federation, e-mail: [d.kovalev@imgg.ru](mailto:d.kovalev@imgg.ru)

**Peter D. Kovalev**, Dr. Sci. (Eng), Lead Researcher of the Laboratory of wave dynamics and coastal currents, Institute of marine geology and geophysics, Nauki st., 1b, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russian Federation, e-mail: [d.kovalev@imgg.ru](mailto:d.kovalev@imgg.ru)

**Aleksander S. Borisov**, Ph.D. (Eng), Senior Research Fellow of the Laboratory of wave dynamics and coastal currents, Institute of marine geology and geophysics, Nauki st., 1b, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russian Federation, e-mail: [d.kovalev@imgg.ru](mailto:d.kovalev@imgg.ru)



УДК 621.371

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.008

## Сеть метеорной связи в системе обеспечения мониторинга технических средств безопасности мореплавания Северного морского пути

В.Л. Мартынов<sup>1</sup>, В.И. Дорошенко<sup>1</sup>, И.Л. Скрипник<sup>2</sup><sup>1</sup>Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, <sup>2</sup>Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России

**Аннотация.** Изложены возможности и особенности использования в Арктической зоне России сети метеорной связи, которую целесообразно применить в целях обеспечения безопасности функционирования объектов транспортной инфраструктуры Северного морского пути, что способствует повышению экономической эффективности в целом всего морского транспортно-технологического процесса, а также для обеспечения безопасности судоходства в указанном регионе с учетом специфики распространения УКВ-радиосигналов и больших расстояний между объектами. Представлена временная диаграмма, характеризующая процесс функционирования радиолинии метеорной связи, соответственно, для оценки прерывистости связи предлагается использовать специальный параметр под названием коэффициент использования радиолинии. Показано, что для обеспечения энергетического контакта необходимой длительности между удаленными ведущими и ведомыми станциями метеорной связи в качестве пассивного ретранслятора может насыщенный метеорный след, способный обеспечить требуемую устойчивую связь, удовлетворяющей заданным требованиям по защите информации и по вероятности ошибочного приема ложных знаков с сохранением целостности сообщений при условии прерывистости энергетических контактов между корреспондентами.

**Ключевые слова:** мониторинг, технические средства, безопасность мореплавания, сеть метеорной связи, топология, радиолиния метеорной связи, пропускная способность, идентификация.

## Meteor communication network in the monitoring system for technical means of navigation safety of the northern sea route

Victor L. Martynov<sup>1</sup>, Victor I. Doroshenko<sup>1</sup>, Igor L. Skripnick<sup>2</sup><sup>1</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, <sup>2</sup>Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia

**Abstract.** This paper describes the possibilities and features of using the meteor communication network in the Arctic zone of Russia. It is advisable to use this meteor communication network in order to ensure the safety of the transport infrastructure of the Northern sea route. This contributes to the overall economic efficiency of the entire Maritime transport and technological process. Also, it is appropriate to ensure the safety of navigation in the region, taking into account the specifics of the propagation of VHF radio signals and long distances between the objects. A timing diagram characterizing the operation of the meteor radio link is presented, so it is proposed to use a special parameter called the radio link utilization factor to estimate communication discontinuity. It has been shown that a saturated meteor trail can be used as a passive repeater to provide energy contact of the desired duration between the remote leading and trailing meteor communication stations. This is capable to provide the required stable communication that meets the specified data protection requirements. And it is also urgent for the probability of erroneous false signs reception with preservation of messages integrity under condition of energy contacts discontinuity between correspondents.

**Keywords:** monitoring, technical means, navigation safety, meteor communication network, topology, meteor communication radio link, capacity, identification.

### Введение

Для качественной и своевременной реализации государственной стратегии в области освоения Арктического региона сегодня требуется создание разветвленной инфотелекоммуникационной инфраструктуры Российской Федерации, согласно которой должны быть реализованы такие процессы как сбор, анализ, обработка, хранение и распределение информации о реальной обстановке, связанной с безопасностью морского судоходства по Северному морскому пути [1-3,12]. При этом однозначно нужно учитывать наиболее рациональные пути реализации доступных видов связи в указанном регионе исходя из условий обязательного соблюдения экологических требований и норм [5-7].

Во всём мире широко примеряются системы метеорной радиосвязи на ультракоротких волнах (УКВ), которые позволяют без ретрансляций перекрывать расстояния до 2000 км. Это весьма

актуально для малонаселённых районов Арктического региона России, в которых интенсивные полярные сияния нарушают радиосвязь. Для этого региона характерно то, что различные объекты, обеспечивающие морской транспортно-технологический процесс (МТТП) удалены на большие расстояния, а связь между ними осуществлять очень сложно.

Исследования, проводимые на протяжении последних лет, показали всю сложность решения проблемы организации связи с корреспондентами расположенными в малонаселённых районах севера России. Один из сложнейших вопросов в МТТП является обеспечение безопасности мореплавания в морских портах при расхождении крупнотоннажных судов [11]. В Российской Федерации накоплен большой опыт создания систем управления движением судов в морском порту в европейской части страны. К сожалению, в портах Северного морского пути (СМП) таких систем или нет, или их

создание находится в начальной стадии разработки.

Автоматизация МТТП и охраны, как грузов, так и объектов осуществляющих МТТП, производится с использованием сложных технических средств [4, 5]. Мониторинг работоспособного состояния всех этих технических средств разнесенных на большие расстояния требует наличия устойчивой связи между этими объектами. Естественно, что для автоматизированного мониторинга каждый объект, на котором находится такое техническое средство, должен быть оборудован автоматическим датчиком работоспособности как технического средства, так и безопасности объекта, на котором это средство установлено. Мониторинг осуществляется путём автоматической передачи данных с этих датчиков в центр мониторинга. Одним из высоконадёжных и экономически целесообразных средств связи для передачи таких данных является сеть метеорной связи (МС). В настоящее время сети метеорной связи не используются в арктическом регионе России. Поэтому данная статья направлена на обоснование целесообразности использования, исследования особенностей и потенциальных возможностей радиолиний метеорной связи (РМС) УКВ диапазона для передачи данных между удалёнными объектами Северного морского пути, а также между объектами инфраструктуры прилегающему к этому региону.

Для реализации процесса автоматизации управления движением судов СМП сегодня широко используется система управления движением судов (СУДС), представляющая собой большую техническую систему. Для обеспечения нормального её функционирования необходимо осуществлять постоянный мониторинг работоспособности всех входящих в неё технических средств (ТС). Её инфраструктура содержит огромное количество технических средств типа автоматизированных радиотехнических постов (АРТП), береговых радиолокационных станций (БРЛС), светящихся знаков, бакенов и др., расположенных на большом расстоянии. Их обслуживание, то есть поддержание в исправном состоянии, является сложной и далеко не всегда реализуемой задачей в условиях отсутствия специализированной сети мониторинга, а также больших эксплуатационных экономических затрат [8].

Мониторинг работоспособности технических средств (ТС) СУДС может осуществляться только лишь при помощи соответствующей сети с использованием простых и экономичных для условий Арктики России линий связи. Одним из таких видов может выступить сеть на основе РМС, способных обеспечивать передачу (прием) информационных данных на расстояние до 2000 км. Сама по себе сеть мониторинга работоспособности ТС СУДС в сущности является компьютерной сетью, в которой функция мониторинга осуществляется путем обмена формализованными сообщениями, предназначенными для их автоматизированной обработки в ЭВМ [2, 3].

Системы связи на базе РМС являются своего рода интеллектуальными системами и занимают определенное место в области инфотелекоммуникационных технологий. Они способны поддерживать надежную статистически устойчивую связь, обладают высокой живучестью,

низкой вероятностью перехвата по сравнению с коротковолновыми или спутниковыми системами, применяющимися на гражданских объектах, являются быстро восстанавливаемыми при возникновении внештатных ситуаций и практически не подвержены электромагнитным помехам, имеющим место в Северных широтах России [3].

Региональные зоны покрытия предлагаемой сети для обеспечения мониторинга ТС СУДС СМП обозначены на рис. 1 [10].



Рис. 1 – Региональные зона покрытия сетями метеорной связи (МС) СМП

### 1. Энергетический контакт

Для установления надежной связи между объектами сети МС должны выполняться условия энергетической доступности между теми сетевыми элементами, где должен быть обеспечен информационный обмен.

Метеорные следы принято классифицировать по такому показателю, как линейная электронная плотность: при количестве менее, чем  $2 \cdot 10^{14}$  электронов на 1 м длины — ненасыщенный след, свыше  $2 \cdot 10^{14}$  электронов — насыщенный. Характер изменения уровня мощности принимаемого сигнала для ненасыщенных и насыщенных метеорных следов представлен на рис. 2 [7, 9].

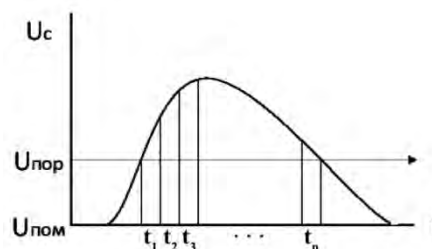


Рис. 2 – Временная диаграмма, характеризующая использование насыщенного метеорного следа для установления связи и передачи служебных и информационных данных

С точки зрения электросвязи ненасыщенные следы от вспышек метеоров довольно многочисленны, однако они имеют слишком кратковременные энергетические контакты между корреспондентами метеорной сети на УКВ-радиолиниях. В то же время насыщенные следы менее многочисленны, но они способны обеспечить более длительные энергетические контакты, что дает возможность организовать статистически устойчивую связь между сетевыми элементами (корреспондентами).

В случае отражения радиосигнала от метеорных насыщенных следов (с большой концентрацией

электронов), а именно этот вариант предлагается использовать для устойчивой метеорной радиосвязи, зависимость мощности сигнала на входе приемника от времени  $P_{вх}(t)$  носит следующий характер:

$$P_{вх}(t) = A \sqrt{tD \ln \frac{\tau}{t}}, \quad (1)$$

где  $A$  – коэффициент пропорциональности,  $t$  – длительность импульса полезного сигнала (отраженного от насыщенного метеорного следа,  $D$  – коэффициент диффузии,  $\tau$  – постоянная времени, которая определяется формулой:

$$\tau = \frac{10^{-7} e^2 a \lambda^2 \sec^2 \theta}{4m\pi^2 D}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – рабочая длина волны передатчика,  $\theta$  – половина угла отражения электромагнитной волны от метеорного следа  $a$  – линейная плотность электронов,  $e$  и  $m$  – соответственно заряд и масса электрона.

Из всего вышесказанного ясно, что связь может существовать на протяжении определенных интервалов времени, длительность которых может быть описана только статистически и не может быть предсказана в каждом отдельном случае [9]. Для оценки прерывистости работы РМС вводится специальный параметр – коэффициент использования РМС, который представляет собой отношение времени, в течение которого возможна передача информации по РМС, ко времени, в течение которого аппаратура в корреспондирующих пунктах находится в рабочем состоянии. Коэффициент использования РМС  $K_{и}$  находится в пределах от нуля до единицы, и также может выражаться в процентах:

$$K_{и} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{ci}}{t_{н}}, \quad (3)$$

где  $t_{ci}$  – длительность  $i$ -го прохождения сигнала, измеренная относительно уровня  $U_{пор}$  порогового напряжения, с;  $t_{н}$  – общее время наблюдения отраженных сигналов, с.

Коэффициент  $K_{и}$  зависит, прежде всего, от длины волны, мощности передающей станции, коэффициента усиления и ширины диаграммы направленности антенной системы, угла направления максимума излучения, значения  $U_{пор}$ , определяемого заданным соотношением сигнал / помеха ( $U_c / U_{пом}$ ) на входе радиоприемного устройства (рисунок), а также от числа и частоты

появления в ионосфере метеорных следов. Изменения количества, и направления движения, разброс массы метеоров в течении суток (времени года) приводит к существенным колебаниям  $K_{и}$ . В большинстве случаев величина  $K_{и}$  составляет 0,05-0,1 [6].

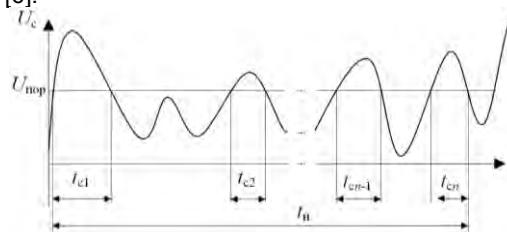


Рис. 3 – Временная диаграмма, характеризующая процесс функционирования РМС

В течение одного энергетического контакта (существования насыщенного метеорного следа) между корреспондентами необходимо передать служебные сигналы ( $t_{сс}$ ) в виде цифровых паролей и желательно, если позволит длительность метеорного следа, то и часть информационных данных ( $t_{экпд}$ ):

$$t_{эки} = t_{сс} + t_{экпд}, \quad (4)$$

где  $t_{эки}$  – длительность  $i$ -го энергетического контакта между ведущей и ведомой станцией РМС;  $t_{экпд}$  – доля энергетического контакта, используемая для передачи информационных данных;

$t_{сс}$  – доля энергетического контакта, приходящегося на обмен цифровыми паролями.

Длительность отраженных от насыщенных метеорного следа УКВ-радиосигналов, как правило, не превышает 200–300 с.

## 2. Пропускная способность сети на базе РМС

Топология современной инфотелекоммуникационной сети представляет собой достаточно сложную многоуровневую структуру, в которой реализуются функции доступа между сетевыми элементами и обмен информацией. Протоколы взаимодействия элементов сети и подсетей реализуются стандартными аппаратно-программными решениями согласно применяемым технологиям. Сама сеть МС в Арктическом регионе России представляет собой набор взаимосвязанных региональных сетей на основе РМС в виде иерархической «звездообразной» архитектуры с головным центром в г. Диксон (рис. 4)

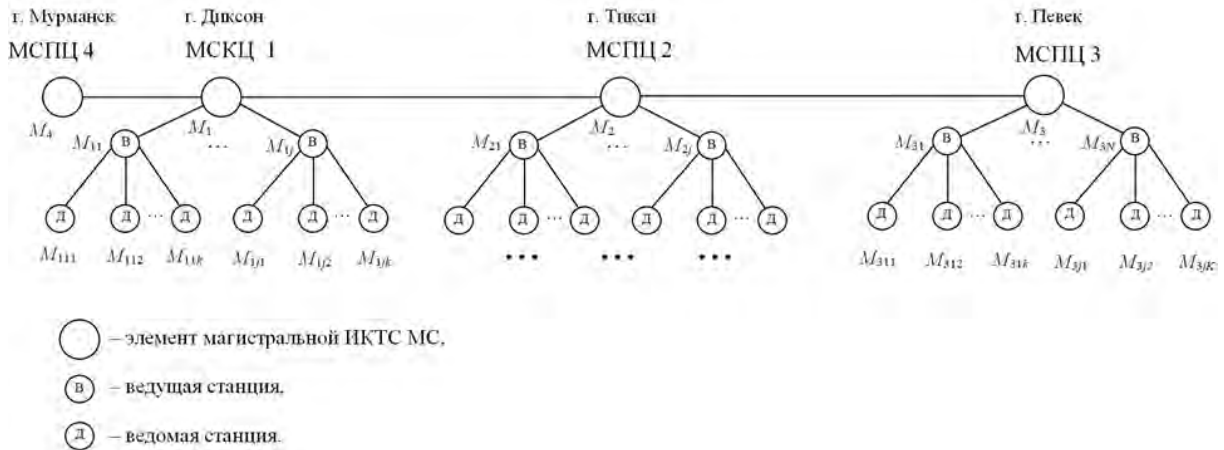


Рис. 4 – Топология сети МС СМП: МСКЦ – морской спасательно-координационный центр (г. Дикси), МСПЦ – морской спасательный подцентр

В формализованном виде сеть можно представить в виде множества:  $M = \{M_{ijk}\}$ ,  $i = 1, 4, j = 1, N, k = 1, K$ , где  $M$  – отдельный сетевой элемент,  $i$  – номер сетевого элемента магистрали,  $j$  – номер ведущей станции РМС  $i$ -ого элемента,  $k$  – номер ведомой  $j$ -ой ведущей станции,  $N$  и  $K$  – число ведущих и ведомых станций РМС соответственно. Взаимодействие между сетевыми элементами осуществляется по иерархическому принципу: корреспондент радиосети – абонент региональной подсети метеорной связи.

Исходя из условий прерывного установления связи между корреспондентами, возникает вопрос о пропускной способности метеорного радиоканала и соответственно всей сети. Здесь следует отметить, что сеть МС СМП может быть использована только лишь в системах, не требующих высоких объемов и скоростей передачи данных. Информация передается в виде так называемых формализованных сообщений.

Максимальный объем информационных данных, который можно передать за время существования насыщенного метеорного следа [8-12], может быть выражен как:

$$V = \int_0^{\infty} \Delta F \cdot \log_2 \left( 1 + \left( \frac{S_0}{N} \right)^2 e^{-\frac{2t}{\tau}} \right) dt, \quad (5)$$

где  $\Delta F$  – ширина полосы пропускания метеорного радиоканала,  $S_0/N$  – отношение сигнал / помеха на входе приемника,  $\tau$  – постоянная времени рассеяния следа,  $t$  – длительность существования насыщенного метеорного следа.

Пропускная способность элемента сети (С) определяется возможностью передачи максимального объема информации за время сеанса связи  $t_n$ :

$$C \geq \max \left( \frac{\sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^M V_{ij}}{t_n} \right), \quad (6)$$

Здесь  $V_{ij}$  – объем информации  $j$ -го энергетического контакта между корреспондентами для передачи данных на  $i$ -ый элемент сети;  $t_n$  – интервал времени сеанса связи по  $i$ -ому каналу;  $R$  – число каналов связи;  $M$  – число энергетических контактов между корреспондентами, имеющих место на интервале времени сеанса связи  $t_n$  с  $i$ -ым элементом сети.

Как следует из формулы (4) для передачи максимального количества информации необходимо обеспечить соответствующее соотношение сигнал/помеха. Для повышения данного показателя авторами предлагается применить вместо традиционных антенных систем (в большинстве случаев используются 5-ти элементные антенны типа «волновой канал») адаптивные антенные решетки, способные сканировать метеорный след наибольшей плотности и значительно повысить коэффициент усиления.

### 3. Обеспечение целостности и безопасности передаваемых формализованных сообщений мониторинга

Количественно безопасность вызова требуемой станции корреспондента на связь в РМС оценивается как вероятность  $P_{ли}$  ложного формирования сигнала для идентификации канала передачи данных по РМС [8]. В этом случае:

$$P_{ли} = P_{лТС} P_{лСкр2} P_{лСкр1}, \quad (7)$$

где  $P_{лТС}$  – вероятность ложного формирования сигнала тактовой синхронизации на приеме,  $P_{лСкр2}$  – вероятность ложного формирования отрезка псевдослучайной последовательности Скр2 вызываемой станции корреспондента (цифрового пароля вызываемой станции);  $P_{лСкр1}$  – вероятность ложного формирования отрезка псевдослучайной последовательности Скр1 вызывающей станции (цифрового пароля вызывающей станции).

Так как длительности сигналов «Скр1» и «Скр2» одинаковы, то вероятности ложного срабатывания этих сигналов будут также равны между собой:

$$P_{лТС} = P_{лСкр1} = P_{лСкр2} = \frac{1}{2^{11}} = \frac{1}{2048} \approx 5 \cdot 10^{-4}, \quad (8)$$

Поскольку для идентификации корреспондентов необходимо процедуру идентификации канала передачи данных повторить в обоих направлениях,



то, следовательно, вероятность того, что канал передачи данных по РМС сформирован правильно, есть полная вероятность ложного формирования сигнала для идентификации канала передачи данных:

$$P_{\text{икпд}} = P_{\text{ли}}^2, \quad (9)$$

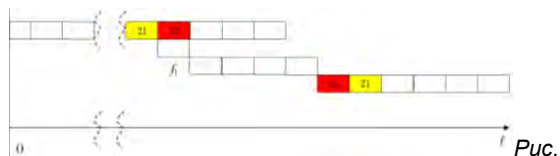
Поэтому, вероятность того, что канал передачи данных по РМС сформирован правильно, определяется по формуле:

$$P_{\text{кпд}} = 1 - P_{\text{икпд}} = 1 - P_{\text{ли}}^2, \quad (10)$$

Таким образом, вероятность  $P_{\text{кпд}}$  правильного формирования сигнала для идентификации канала передачи данных по РМС составит:

$$P_{\text{кпд}} = 1 - (5 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-4})^2 = 1 - (125 \cdot 10^{-12})^2 = 1 - (1,56 \cdot 10^{-20}) \approx 1$$

Из-за прерывистости образования канала приходится применять специальный метод передачи и приема сообщений. При установлении канала связи, характеризующегося прерыванием в течение всего сеанса передачи данных, поступающие сообщения накапливаются, а затем передаются порциями, или пакетами с большой скоростью в те короткие интервалы, когда существует энергетический контакт между корреспондентами (прием и передача). Деление сообщения большого объема на передаче на отдельные пакеты (фрагменты), которые передаются, в течение действия отдельного следа, называется фрагментацией. На приеме происходит обратное действие – дефрагментация, то есть сборка отдельных частей принимаемого сообщения в целое и выдача его в блок формирования структуры сообщения для дальнейшей обработки в ЭВМ (рис. 5).



5 – Фрагментация-дефрагментация формализованного сообщения

Для кодирования сообщений целесообразно применить циклический блочный код, рекомендованный Международным союзом электросвязи (МСЭ),  $(n, k)$ , например, КОИ-7,  $n$  – длина кода в битах,  $k$  – число информационных символов.

### Заключение

1. Метеорная связь в суровых арктических условиях России является наиболее целесообразным видом связи с множеством корреспондентов, расположенных на большой территории и удаленных на расстояние до 2000 км. Статистически устойчивую метеорную связь целесообразно комплексно использовать в Арктическом регионе РФ как для целей повышения эффективности функционирования морского транспортно-технологического процесса, так и для повышения безопасности мореплавания за счет постоянного и непрерывного контроля состояния объектов, обеспечивающих безопасное функционирование Северного морского пути.

2. С целью обеспечения требуемого качества и целостности потока передаваемых данных обоснована целесообразность установления энергетического контакта между корреспондентами при помощи насыщенного метеорного следа.

3. С точки зрения оценки безопасности информации мониторинга сеть метеорной связи способна осуществлять обмен данными между корреспондентами сети, обеспечивая тем самым низкую вероятность попадания данных мониторинга тем корреспондентам, которым она не предназначена, а также низкую вероятность того, что в поток передаваемых данных мониторинга могут быть включены ложные данные. При этом ввиду прерывистости канала связи в сети метеорной связи сохраняется целостность передачи потока информационных сообщений.

### Литература

1. Дорошенко В.И., Стратонова О.Н., Пивоварова А.К. Метеорная связь в районах Крайнего Севера России // Материалы IV Межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов (Санкт-Петербург, Россия, 14 мая 2015 года). Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России. СПб.: ГУМРФ, 2015. – С. 31–33.
2. Ксенофонтов Ю.Г. Система мониторинга технического контроля целостности нефтяных трубопроводов в Арктике с использованием сети метеорной связи // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. 2019. – С. 240-246.
3. Ксенофонтов Ю.Г. Комплексный подход к решению технического обеспечения оперативного мониторинга Северного морского пути и объектов инфраструктуры Арктики // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. 2019. – С. 264-269.
4. Ксенофонтов Ю.Г., Воронин С.В. Сеть передачи данных на основе радиолиний метеорной связи в системе обеспечения безопасности функционирования объектов инфраструктуры Северного морского пути // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 16-25 октября 2019 года. Санкт-Петербург. 2019. – С. 130-137.

5. Дорошенко В.И., Ксенофонтов Ю.Г. Применение метеорной связи в системах обеспечения безопасности объектов инфраструктуры Северного морского пути // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. Серия 16. 2019. № 1–2(127–128). – С. 3–11.
6. Ксенофонтов Ю.Г., Скрипник И.Л., Воронин С.В. Радиолинии метеорной связи в информационно-телекоммуникационной инфраструктуре МЧС России Арктического региона // Проблемы управления рисками в техносфере: научно-аналитический журнал. – СПб. 2019. № 3 (51). – С. 6-12.
7. Качнов А.И., Пенкин А.А., Рыбаков А.В. Разработка мобильной системы информационного обеспечения с использованием каналов метеорной связи // V Международной научно-технической и научно-методической конференции (Санкт-Петербург, Россия, 10–11 марта 2016). Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сборник научных статей. СПб.: СПбГУТ, 2016. – С. 177–181.
8. Ксенофонтов Ю.Г., Дорошенко В.И., Пивоваров А.Н. Повышение информационной безопасности каналов мониторинга в сетях метеорной связи Арктики России // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2019. № 3. – С. 41-48.
9. Дорошенко В.И., Ксенофонтов Ю.Г. Применение метеорной связи в системах обеспечения безопасности объектов инфраструктуры Северного морского пути // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. Серия 16. 2019. № 1–2(127–128). – С. 3–11.
10. Дорошенко В.И., Ксенофонтов Ю.Г., Скрипник И.Л. Телекоммуникационный ресурс инфотелекоммуникационной сети метеорной связи Арктики России // Научно-аналитический журнал. Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 16. № 1. 2020. – С.45-55.
11. Бобровская Т.А., Ивахнюк Г.К., Скрипник И.Л. Управление пожарными рисками при осуществлении технологического аудита на предприятиях судоремонтного комплекса // Научно-аналитический журнал. Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России. № 1(2018) – 2018. – С. 31-40.
12. J.I. Idrisova, T.T. Kaverzneva, N.V. Rummyantseva, I.L. Skripnik. Neural Network of safety system for construction equipment in permafrost zone. 4 th International Scientific Conference «Arctic: History and Modernity» IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 302 (2019) 012128.

#### References

1. Doroshenko V.I., Stratonova O.N., Pivovarova A.K. Meteornaya svyaz' v rajonah Krajnego Severa Rossii // Materialy IV Mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii aspirantov, studentov i kursantov (Sankt-Peterburg, Rossiya, 14 maya 2015 goda). Sovremennyye tendencii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii. SPb.: GUMRF, 2015. – S. 31–33.
2. Ksenofontov YU.G. Sistema monitoringa tekhnicheskogo kontrolya celostnosti neftyanyh truboprovodov v Arktike s ispol'zovaniem seti meteornoj svyazi // Monitoring, modelirovanie i prognozirovanie opasnyh prirodnyh yavlenij i chrezvychajnyh situacij: sbornik materialov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2019. –S. 240-246.
3. Ksenofontov YU.G. Kompleksnyj podhod k resheniyu tekhnicheskogo obespecheniya operativnogo monitoringa Severnogo morskogo puti i ob"ektov infrastruktury Arktiki // Monitoring, modelirovanie i prognozirovanie opasnyh prirodnyh yavlenij i chrezvychajnyh situacij: sbornik materialov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2019. – S. 264-269.
4. Ksenofontov YU.G., Voronin S.V. Set' peredachi dannyh na osnove radiolinij meteornoj svyazi v sisteme obespecheniya bezopasnosti funkcionirovaniya ob"ektov infrastruktury Severnogo morskogo puti // Sbornik nauchnyh statej nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova», 16-25 oktyabrya 2019 goda. Sankt-Peterburg. 2019. – S. 130-137.
5. Doroshenko V.I., Ksenofontov YU.G. Primenenie meteornoj svyazi v sistemah obespecheniya bezopasnosti ob"ektov infrastruktury Severnogo morskogo puti // Voprosy oboronnoj tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu. Seriya 16. 2019. № 1–2(127–128). – S. 3–11.
6. Ksenofontov YU.G., Skripnik I.L., Voronin S.V. Radiolinii meteornoj svyazi v informacionno-telekommunikacionnoj infrastrukture MCHS Rossii Arkticheskogo regiona // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere: nauchno-analiticheskij zhurnal. – SPb. 2019. № 3 (51). – S. 6-12.
7. Kachnov A.I., Penkin A.A., Rybakov A.V. Razrabotka mobil'noj sistemy informacionnogo obespecheniya s ispol'zovaniem kanalov meteornoj svyazi // V Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy i nauchno-metodicheskoy konferencii (Sankt-Peterburg, Rossiya, 10–11 marta 2016). Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii: sbornik nauchnyh statej. SPb.: SPbGUT, 2016. – S. 177–181.
8. Ksenofontov YU.G., Doroshenko V.I., Pivovarov A.N. Povyshenie informacionnoj bezopasnosti kanalov monitoringa v setyah meteornoj svyazi Arktiki Rossii // Problemy informacionnoj bezopasnosti. Komp'yuternyye sistemy. 2019. № 3. – S. 41-48.
9. Doroshenko V.I., Ksenofontov YU.G. Primenenie meteornoj svyazi v sistemah obespecheniya bezopasnosti ob"ektov infrastruktury Severnogo morskogo puti // Voprosy oboronnoj tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu. Seriya 16. 2019. № 1–2(127–128). – S. 3–11.
10. Doroshenko V.I., Ksenofontov YU.G., Skripnik I.L. Telekommunikacionnyj resurs infotelekkommunikacionnoj seti meteornoj svyazi Arktiki Rossii // Nauchno-analiticheskij zhurnal. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. T. 16. № 1. 2020. – S.45-55.
11. Bobrovskaya T.A., Ivahnyuk G.K., Skripnik I.L. Upravlenie pozharnymi riskami pri osushchestvlenii tekhnologicheskogo audita na predpriyatiyah sudoremontnogo kompleksa // Nauchno-analiticheskij zhurnal. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii. № 1(2018) – 2018. – S. 31-40.

12. J.I. Idrisova, T.T. Kaverzneva, N.V. Rumyantseva, I.L. Skripnik. Neural Network of safety system for construction equipment in permafrost zone. 4 th International Scientific Conference «Arctic: History and Modernity» IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 302 (2019) 012128.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Виктор Леонидович Мартынов**, доктор технических наук, профессор кафедры Радиосвязи на морском флоте, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru

**Victor L. Martynov**, professor, Dr.Sci. (Eng), Professor of the Department of Maritime Radio Communication, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: martynovvoenmeh@mail.ru

**Виктор Иванович Дорошенко**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Радиосвязи на морском флоте, Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: doroshenko1937@yandex.ru

**Victor I. Doroshenko**, professor, Dr.Sci. (Eng), Professor of the Department of Maritime Radio Communication, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, 198035, Russian Federation, e-mail: doroshenko1937@yandex.ru

**Игорь Леонидович Скрипник**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры Пожарной безопасности технологических процессов и производств, 196105, Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149, e-mail: ig.skripnick2011@yandex.ru

**Igor L. Skrypnick**, senior lecturer, Ph.D. (Eng), Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes and Production, Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia, 196105, Russian Federation, e-mail: ig.skripnick2011@yandex.ru

**ИНФОРМАТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

УДК 656.7.08:656

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.009

**Угрозы безопасности воздушных и морских перевозок в прибрежных зонах акваторий с активной вулканической деятельностью**Е.А. Куклев<sup>1</sup>, Г.М. Петухов<sup>2</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,<sup>2</sup>ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», филиал «Камчатэроавиация»

**Аннотация.** В статье авторы рассматривают проблему обеспечения безопасности полетов и мореплавания в прибрежных районах Тихоокеанского огненного кольца, как наиболее опасного региона мира по активности и влиянию вулканической деятельности на транспортную инфраструктуру стран Азиатско-Тихоокеанского региона. Предлагают принципы ранжирования значимости угроз нарушения условий нормального функционирования транспортных средств в зонах активной вулканической деятельности вследствие воздействия на эти средства продуктов вулканического извержения (пепел с разной дисперсностью, вулканические бомбы, пирокластические и грязевые потоки, цунами, излияние лавы, ядовитые газопаровые продукты извержения остывающей кальдеры и пр.) в зависимости от дистанции до источника вулканизма с момента времени начала его активности. Предложено использовать международные стандарты и классификаторы опасности вулканических процессов при планировании конфигураций транспортных потоков в бизнес-процессах международных перевозок пассажиров и грузов морскими и воздушными судами в периоды эксплозивных извержений вулканов Тихоокеанского огненного кольца.

**Ключевые слова:** рисковое событие, сценарий опасной ситуации, неопределенность информации, безопасность полетов, вулканический пепел

**Forecasting of the safety hazards to aviation and marine operations in some area of water with active volcanic activities**Evgeny A. Kuklev<sup>1</sup>, Gennady M. Petukhov<sup>2</sup><sup>1</sup>St. Petersburg State University of Civil Aviation, <sup>2</sup>Kamchatskii State Corporation Department of Traffic Control

**Abstract.** In the article the authors consider the problem of ensuring safety of navigation in the coastal regions of the Pacific ring of fire as the most dangerous region in the world according to the activity and influence of volcanic activity on the transport infrastructure of the Asia-Pacific region. The authors propose principles for ranking the significance of threats to the normal functioning of vehicles in areas of active volcanic activity due to the impact of volcanic eruption products on these vehicles (ash with different dispersal, volcanic bombs, pyroclastic and mud flows, tsunamis, lava outpouring, poisonous gas-vapor products of an eruption of a cooling Caldera, etc.) depending on the distance to the source of volcanism from the time of its beginning of activity. It is proposed to use international standards and hazard classifiers for volcanic processes when planning traffic flow configurations in the business processes of international transportation of passengers and cargo by sea and aircraft during periods of explosive eruptions of volcanoes of the Pacific Ring of Fire.

**Keywords:** risks event, dangerous situation scenario, uncertainty of information, safety flight, volcanic ash

**Введение**

Актуальность темы обусловлена потребностями транспортных отраслей, которые вынуждены обеспечивать безопасность доставки пассажиров морским или воздушным путем к местам активной вулканической деятельности в периоды пробуждения вулканов. В этом состоит специфика туристического сектора перевозок. Кроме того, возникают ситуации, когда необходимо осуществлять транспортную деятельность именно в периоды вулканической активности при возникающих обстоятельствах. Так было в ситуации в европейском регионе в 2010 году в связи с внезапным извержением Исландского вулкана Эйяфьятлайокудль (Eyjafjallajökull), которая отразилась многомиллионными убытками для авиатранспортной системы гражданской авиации включая и Россию. Стоит отметить, что дальневосточная часть Российской Федерации входит в Тихоокеанское вулканическое «огненное кольцо», где находятся самые активные вулканы мира, что, несомненно, оказывает влияние на

деятельность транспортной системы региона. Важную роль в перевозках грузов морским транспортом занимает Дальневосточный бассейн, на его долю приходится почти 50% отправляемых и получаемых грузов морским транспортом России.

14 марта 2019 года распоряжением правительства Российской Федерации был утвержден комплексный план реализации инвестиционного проекта «Морской перегрузочный комплекс сжиженного природного газа в Камчатском крае». Правительство рассчитывает, что на полную загрузку перевалочный терминал выйдет уже в 2026 г., что «позволит увеличить объем перевозки по Северному морскому пути с 9,7 млн. т в 2017 г. до 31,7 млн. т». В 2023–2025 гг. «Новатэк» планирует поэтапный запуск трех очередей своего второго завода по сжижению газа – «Арктик СПГ – 2». С учетом уже работающего «Ямал СПГ» суммарная мощность проектов «Новатэка» в 2026 г. будет составлять около 38 млн. т СПГ в год.

Для «Новатэка» строительство перевалочного терминала на Камчатке – один из способов



оптимизировать транспортные расходы, связанные с доставкой СПГ в Азиатско-Тихоокеанский регион, который компания рассматривает как один из целевых рынков. Схема доставки СПГ в Юго-Восточную Азию, представлена на рис. 1. Увеличение мощностей портов Тихоокеанского бассейна будет способствовать укреплению экономических связей России со странами Азиатско-Тихоокеанского региона, дальнейшему развитию судоходства.



Рис. 1. Маршрут транспортировки Российского сжиженного газа морскими судами ледового класса в Юго-Восточную Азию (источник: Новатэк)

Обеспечение безопасности мореплавания, невозможно без учета природных рисков Тихоокеанского «огненного кольца». В связи с этим предлагается решать вопросы, сформулированные в статье, в рамках риск-ориентированного подхода ИКАО-НАСА [1] по оценке угроз транспортной

деятельности, осуществляемой в зонах активно действующих вулканов разных типов. Контакты морских судов (МС) и воздушных судов (ВС) с продуктами вулканических извержений достаточно редкие, хотя ущербы от названных продуктов могут быть значимыми. Поэтому представляется возможным применить в ряде прогнозируемых возможных ситуациях следующие алгоритмические схемы оценки степени значимости обнаруживаемых угроз [2-5]:

- путем построения «уровней катастрофы» в смысле прогнозирования сценария возможного воздействия продуктов вулканического извержения на движущиеся (и неподвижные) транспортные средства (ТС): ВС, МС и на персонал (на пассажиров);

- путем разработки схем и способов снижения рисков возникновения негативных последствий для транспортной деятельности в зонах действующих вулканов.

### 1. Постановка задачи, параметры вулканических угроз транспортным средствам

Число контактов ВС с продуктами вулканов за 60 лет представлено в виде графика на рис.2. На рис.3 показаны размеры извергаемой вулканической массы, в виде некоторых «колонн» с уровнем опасности в соответствии с классификатором по индексу VEI (Volcanic Explosivity Index) [4].

Из рис.2 видно, что событие типа «контакт ВС с пеплом и т.п.» - редкое, по крайней мере, для 2-х классов вулканов.

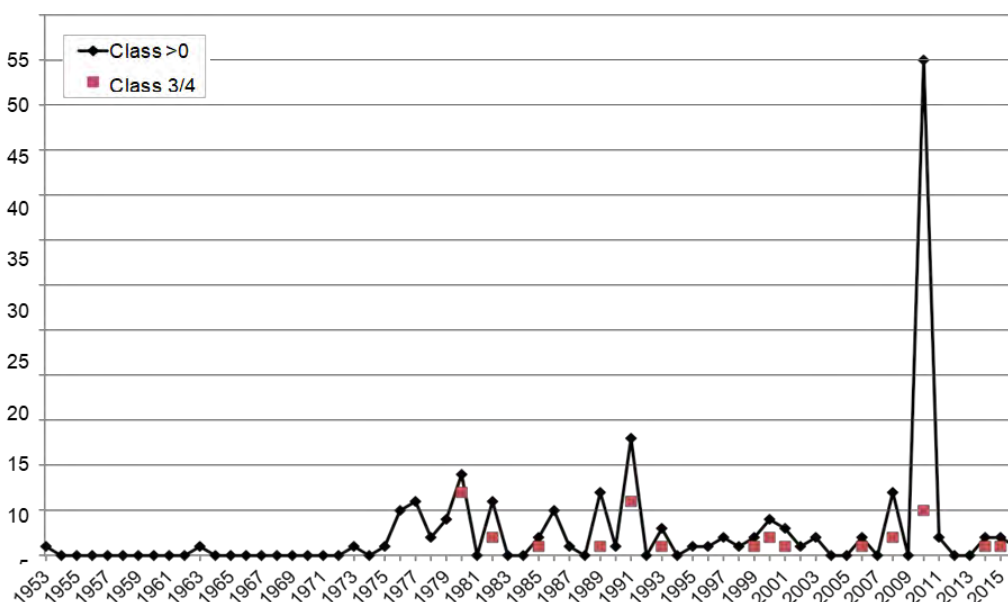


Рис. 2. Частота контактов ВС с облаками вулканического пепла (1953 – 2016 г.г.)

В данной работе при указанных условиях необходимо найти способы и алгоритмы оценивания рисков возникновения опасных ситуаций для ВС (или для МС) при учете ряда следующих важнейших параметров, характеризующих возможные условия проявления активной вулканической деятельности в зоне применения ТС или МС:

- статистика вулканических извержений, соотношение состава продуктов извержения (рис.3), модель распространения вулканического шлейфа;
- ранжирование рисков возникновения аварий с ВС (или МС) в зависимости от высот полетов или удаления ВС (или МС) от источников вулканической деятельности;

- адекватная модель возможного развития опасной ситуации с учетом индекса типа извержений по стандартам ИКАО (*index VEI из табл. 1 и 2*);
- схемы организация полетов в районах вулканической деятельности с оценкой последствий по процедурам «Взвешивания рисков и шансов»;
- использование «Паспорта безопасности вулкана» для траекторий полетов ВС и маршрутов плавания МС;
- применение аварийного плана действий ТС на случай катастрофического извержения вулкана.

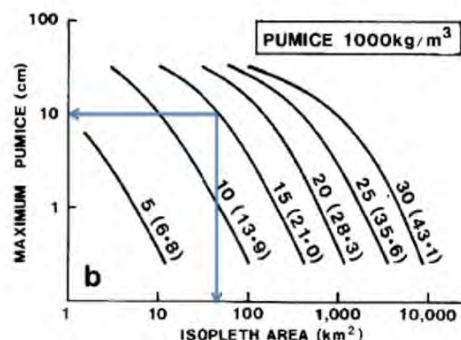


Рис. 3. Высота колонны вулканического пепла [2]

Таблица 1.

**Классы тяжести последствий контактов ВС с облаками пепла**

Класс	Критерии
0	- серный запах, отмечаемый в кабине экипажа, «огни св. Эльма» на фюзеляже; электростатические разряды
1	- запыленность кабины экипажа и осаждение пепла на внешней поверхности воздушного судна и др.
2	- запыленность кабины экипажа типа условий «ночной тьмы» - загрязнение различных систем жизнеобеспечения судна - абразивное истирание внешних и внутренних поверхностей, двигателей и лопаток компрессора - наплавление пепла в двигателе
3	- вибрация или помпаж и повреждение двигателей
4,5	- временный или катастрофический отказ двигателей

Таблица 2.

**Индекс VEI для оценки силы вулканических извержений (VEI-Volcanic explosivity index) с параметрами: V – объем извержения, H – высота эруптивной колонны.**

VEI	V (м³)	H (км)	Описание характеристик для оценки силы вулканических извержений
0	<10 <sup>4</sup>	<0.1	<i>неэксплозивное</i> , высота столба пепла и газа менее 100 метров, объем выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в тысячах кубометров; происходят ежедневно
1	10 <sup>4</sup> -10 <sup>6</sup>	0.1-1	<i>слабое</i> , высота столба пепла и газа от 100 до 1000 метров, объем выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в десятках и сотнях тысяч кубометров; происходят ежедневно
4	10 <sup>8</sup> -10 <sup>9</sup>	10-25	<i>катаклизмическое</i> , высота столба пепла и газа от 10 до 15 км, объем выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в сотнях миллионов кубометров; происходят раз в десятилетия
6	10 <sup>10</sup> -10 <sup>11</sup>	>25	<i>колоссальное</i> , высота столба пепла и газа свыше 25 км, объем выбрасываемого в воздух вулканического материала измеряется в десятках кубических километров; происходят раз в столетия, пример – извержение Кракатау в 1883 году
8	>10 <sup>12</sup>	>25	<i>мегаколоссальное</i> , высота столба пепла и газа свыше 25 км, объем вулканического материала в тысячах кубических километров (один раз в десятки тысяч лет типа Йеллоуинстонского извержения)

Опасные воздействия продуктов вулканического извержения на ВС по стандарту (*индексу VEI [4]*) в зависимости от параметров активности вулканов представлены в таблице 1. При этом основные

показатели ИКАО по классам «1-5» [2] тяжести последствий контактов ВС с облаками пепла также представлены и в таблице 2.

## 2. Методические принципы построения моделей полетов ВС в неблагоприятных ситуациях с учетом значимости угроз безопасности в зонах вулканической активности

### 2.1. Факторы опасности при использовании ТС в неблагоприятных ситуациях

Факторы опасности для полетов ВС в неблагоприятных ситуациях назначаются, в первом приближении, на основе стандартов ИКАО [1] из главы 4, принимается классификация факторов в следующих 3-х видах: естественные факторы опасности и техногенные, достаточно значимые для безопасности полетов в зонах вулканической деятельности, и особые.

*Естественные факторы* опасности, проявляющиеся вследствие воздействия окружающей среды на транспорт с учетом специфики условий деятельности. Естественные факторы опасности, следующие:

- экстремальные климатические явления (ураганы, метели, засухи, смерчи, грозы, молнии и сдвиг ветра);
- неблагоприятные погодные условия типа обледенения ВС (ливень, снег, ветер и пр.);
- геофизические явления (типа землетрясений, извержения вулканов);
- географические условия (неблагоприятный рельеф местности, большие водные пространства и т.п.).

### 2.2. Особые виды опасностей для ТС при вулканических явлениях

К особым видам опасностей для ТС, находящихся в вулканических зонах, отнесены следующие [6,7]:

- образование ингимбритовых покровов при формировании больших кальдер, обвалы постройки вулкана (лавины, вулcano-гляциальные оползни);
- пароксизмальные взрывы с образованием взрывных кальдер, коллапс эруптивной колонны, со сходом пирокластических потоков и палящих туч;
- грязевые потоки (лахары), взрывные извержения с выбросом тefры (лапилли, вулканические бомбы);
- пеплопады разных фракций: вулканический песок, вулканическая зола, лавовые потоки;
- вулканические землетрясения (и Цунами);
- вулканические газы и растворимые компоненты изверженных пород.

## 3. Модели рисков ситуаций и опасных сценариев полётов ВС в регионах с признаками возможности пробуждения или действия вулканов

### 3.1. Нечеткие меры оценки возможности возникновения рисков событий

Ситуации с воздействием опасных факторов на ТС, применяемых в зонах активных вулканов, столь многообразны и значимы с точки зрения необходимости уменьшения вредных последствий даже при очень редких событиях. Поэтому только применение теории риск-ориентированного подхода, рекомендуемого ИКАО [1] с учетом трактовок ряда положений по НАСА [5], позволяет получить конструктивные результаты при решении задач, сформулированных в данной статье.

В связи с этим целесообразно применить универсальные методы теории оценки рисков возникновения неблагоприятных последствий из теории проф. Е.А. Куклева [5], которые отражают идеологию SARPS ИКАО и НАСА [2, 3].

Для описания движения ВС (или МС) в сформулированной задаче предлагается применить метод динамического моделирования процессов смены дискретных состояний под воздействием соответствующих опасных факторов (из п.п. 2.1, 2.2 – выше) [4]. При этом могут быть найдены последовательности состояний в множествах «минимальных сечений отказов» (МСО – по И.А. Рябину, И.А. Аронову [5]). При использовании риск-ориентированного подхода возникновение МСО обозначает «потерю свойств функциональности системы», т.е. попадание системы в «состояние катастрофы» в широком смысле этого понятия (типа: вред, ущерб, авария, инцидент и т.п.). Набор признаков в МСО может быть признан идентификатором негативного состояния. При идентификации рисков в рассматриваемой задаче необходимо заранее (*априори*) находить подобный идентификатор опасностей. В связи с этим предлагается ввести новое определение – «уравнение катастроф»  $U_R$ , и найти это уравнение.

Предлагается построить «уравнение катастроф» в форме соотношений типа «дизъюнкции конъюнкций» для логических признаков критических состояний системы в соответствии с описанием функциональных моделей исследуемых систем. Используются методические положения теории системной безопасности (ТСБ) и моделей рисков, предложенные в [5] для ситуаций с редкими событиями – с рисковыми событиями типа  $R$ . Возможности возникновения подобных рисков событий таковы, что они происходят с «вероятностью - почти ноль». Из этого следует, согласно [5], что необходимо строить модели рисков и процессов функционирования ТС на основе подхода *Fuzzy Sets* и нечетких множеств, поскольку необходимая статистика отсутствует и не может быть найдена объективно [5].

*Риск* здесь понимается не в виде события или «вероятности», как дано в ВАБ [5], но совершенно иначе – по НАСА [5]: в форме  $\hat{R}$ , обозначающей понятие «**риск**» – прогнозируемое «количество опасности», принимаемого в качестве нового прогнозируемого показателя критичности или опасности дискретных состояний системы. При этом по ИКАО система может считаться безопасной, если прогнозируемый или расчетный риск  $\hat{R}$  не превышает приемлемого уровня риска  $\hat{R}_*$ :

$$\hat{R} < \hat{R}_* \quad (1)$$

Проблема состоит теперь в том, что необходимо построить алгоритм проверки условий (1) на основе принятых здесь положений риск-ориентированного подхода для ситуаций с угрозами, возникающими для ТС в зонах с активными вулканами. Принимается (как общепринято [5]), что свойства дискретных состояний систем меняются сразу же - «скачком», как только возникла некоторая угроза  $Z_R$  безопасности полета ВС (или МС) за счет возможности

возникновения прогнозируемого рисковог о события  $R$ . Возможность возникновения  $R$  является следствием проявления и возникновения угрозы  $Z_R$  в точке уязвимости системы. Данное утверждение следует трактовать следующим образом. Обнаружение любого контакта ТС с продуктами вулканической деятельности следует классифицировать как возникновение угрозы безопасности полетов. Эта схема также применима и при проактивной оценке возможностей возникновения угроз при составлении планов полетов ВС или планов применения любых других ТС в зонах вулканизма (например, парапланов, дельтапланов или некоторых МС). Каждая угроза обозначает появление с нечеткой мерой  $\mu$  (с мерой  $\mu$  по Fuzzy Sets) возможностей возникновения соответствующего рисковог о события  $R$ . Количество опасности  $\hat{R}$ , введенное в [5] и определяемое данным рисковым событием в конкретной ситуации, принимается за интегральную меру  $\hat{R}$  значимости риска в виде:

$$\hat{R} = \hat{f}(R | Z_R, \Sigma_0, \mu, L_R), \quad (2)$$

где  $L_R$  – возможная цепь физических (прогнозируемых) элементарных событий, ведущих к катастрофе в полетной ситуации ВС с момента возникновения этой угрозы  $Z_R$ ;

$\mu$  – нечеткая мера возможности возникновения цепи  $L_R$  и, что то же самое, рисковог о события  $R$ . В данной методике принято, что никакие вероятностные показатели не используются, поскольку «вероятности» как математические показатели меры неопределенности возникновения «редких событий – с вероятностью почти ноль» объективно не существуют. Функция  $\hat{f}$  дает схему вычисления и шкалу измерения  $\hat{R}$ : по ИКАО (НАСА) [2,5] – в виде комбинации символов из «матрицы анализа рисков» или в некоторых баллах опасности [5], принятых по соглашениям транспортных предприятий.

Важно отметить, что критичность меры риска  $\hat{R}^*$  из (1) в каждой конкретной ситуации с ТС (в фактической или в предполагаемой) зависит от вида цепи событий  $L_R$ . Для каждой цепи событий, ведущих к катастрофе или к аварии, может быть составлено соответствующее четкое по данным Fuzzy Sets «уравнение катастрофы», зависящее только от структуры системы особенностей бизнес-процессов в зонах активных вулканов. Эта формулировка полностью совпадает с положением Дж. Ризона о том, что «катастрофа заложена в каждую систему», но не всякая реализуется часто (т.е. только по мере  $\mu$ ). Эту меру невозможно выразить через какие бы то ни было вероятностные показатели. Но при этом нечеткую меру возможности можно рассчитать заранее и управлять безопасностью процессов и состояний, что и предлагается в данной работе.

### 3.2. Построение логических моделей полета ВС с учетом факторов опасности в зонах вулканической активности

Рассматриваются для простоты два типа моделей:  $M1$  – штатный полет ВС, когда «вулкан спит»;  $M2$  – опасная ситуация, когда вулкан находится в активном состоянии, с показателем опасности по классификатору VEI [1,2], приведенному в данной статье. Факторы опасности  $\varphi_j$  – логические величины со значением «0» или «1» – введены по стандарту ИКАО [1], указанному выше в п.п.3. Например, факторы опасности, определяющие угрозу  $Z_R$  при обнаруженном вулканическом пепле, будут [6]:

$\varphi_0$  – SIGMETWV (формализованное извещение пилотам о вулканическом извержении);

$\varphi_1$  – ВС в некоторых зонах  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  активности продуктов извержения;

$\varphi_2$  – ошибка экипажа ВС (в виде упреждающего своевременного снижения) при известном признаке  $\varphi_1$ ;

$\varphi_3$  – признак обнаруженного контакта с облаком вулканического пепла. При этом могут быть найдены и выделены и другие признаки условий воздействия на ВС (или МС) выявленной или прогнозируемой угрозы  $Z_R$ .

Контакт ВС с облаком пепла (или другим видом продуктов извержения) – это уже угроза безопасности полетов ВС. Это признак того, что через некоторое время  $\Delta T_R \in [t_0, T]$  возможно возникновение рисковог о события  $R$  (например, повреждение ВС, авария и пр.):

$$R \sim (\omega_R, H_R \{ \varphi_j \}), \quad (3)$$

где  $H_R$  – ущерб,  $\omega_R$  – элементарное событие в одиночном опыте,  $\{ \varphi_j \}$  – множество факторов, определяющих сценарий или цепь событий  $L_R$ .

Оценка  $\hat{R}$  по (3) получается в виде:

$$\hat{R} = \hat{f}_R(\varphi_0 \wedge \varphi_1 \wedge \varphi_2 \wedge \varphi_3 \dots | Z_R, \mu, H_R). \quad (4)$$

В результате интегральная оценка  $\hat{R}$  из (4) примет вид:

$$\hat{R} = \hat{f}_R(\mu, H_R | \Sigma_0, Z_R, L_R). \quad (5)$$

В рассмотренном случае общее уравнение катастрофы  $U_R$  будет иметь вид «конъюнкции» факторов, определяющих логическую связь событий в сценариях:

$$U_R = (\varphi_0 \wedge \varphi_1 \wedge \varphi_2 \wedge \varphi_3 \dots | \Sigma_0, Z_R). \quad (6)$$

При  $U_R = U_R^{(1)} = 1$  по (6) получается  $U_R^{(1)} \Rightarrow R$ , т.е. обнаруженная конъюнкция отражает «возникновение» рисковог о события.

Это обозначает, что физически (на основе свойств системы и окружающей среды) в системе прогнозируется (оценка  $\hat{R}$  дается заранее) возможность (не вероятность) возникновения



«катастрофы» с каким-то ущербом  $H_R$ , как было показано в документе ИКАО [1] (в п.п. 4). На основе (5), (6) с помощью уравнения катастрофы (6) можно определить два вида описания ситуаций при полете ВС (или при движении МС) в зоне активного действия вулканов.

**Модель № 1 (штатный полет).** Уравнение «катастрофы» дает конъюнкцию из 2-х факторов:

$$U_R = U_R^{(0)} = (\varphi_0 \wedge \varphi_1 | \hat{\Sigma}_0) = 1, \quad (7)$$

где действие «1» обозначает «конъюнкцию»-неопасная.

Схема оценки риска  $\hat{R}$  по (5) (интегральная) с учетом (7) на основе [5] будет по форме совпадать с (5):

$$\hat{R} = \hat{r}_R(R, H_R, \mu | \Sigma_0), \quad (8)$$

где дополнительно указано, что  $\hat{R}$  зависит от  $R$  по (3) и (4).

Здесь, согласно (7), риск «контакта с облаком пепла» - мал,  $\mu = 0$ , т.к. ведется контроль высоты полета ВС на борту ВС и диспетчером по ВРЛ. Шанс «отсутствия контакта с облаком пепла» (событие - шанс  $\bar{B} \sim \omega_B$  - велик), т.е. «полет не опасен».

**Модель № 2 (полет ВС в условиях контакта с пеплом или другими продуктами вулканов).** Эта

модель получается по аналогии с (5), (6), но при другой размерности «конъюнкции», например, в точности по (4), (6):

$$\mu \neq 0 \Rightarrow U_R \rightarrow U_R^{(1)} \Rightarrow R: \hat{R} - \text{«велико»}. \quad (9)$$

Рассмотренные схемы оценки рисков возникновения «вреда» и «опасности» для ТС разных типов, применяемых в зонах активной деятельности вулканов, позволяют строить конструктивные системы управления безопасностью полетов на основе критерия - «минимизации рисков ущербов» - без применения теории ВАБ [5].

#### 4. Ранжирование рисков с учетом высот (эшелонов) полета ВС

Оценка последствий по процедурам «Взвешивания рисков и шансов» производится на основе моделей М1, М2.

Рассмотренные две указанные модели полетной деятельности № 1 и № 2, представлены на рис. 4 и рис. 5:

а) № 1 – Штатные полёты ВС в районах вулканической деятельности;

б) № 2 – Полёт ВС с проактивным (предупредительным) уклонением от угрозы в форме командного снижения ВС с опасного эшелона на более безопасный.

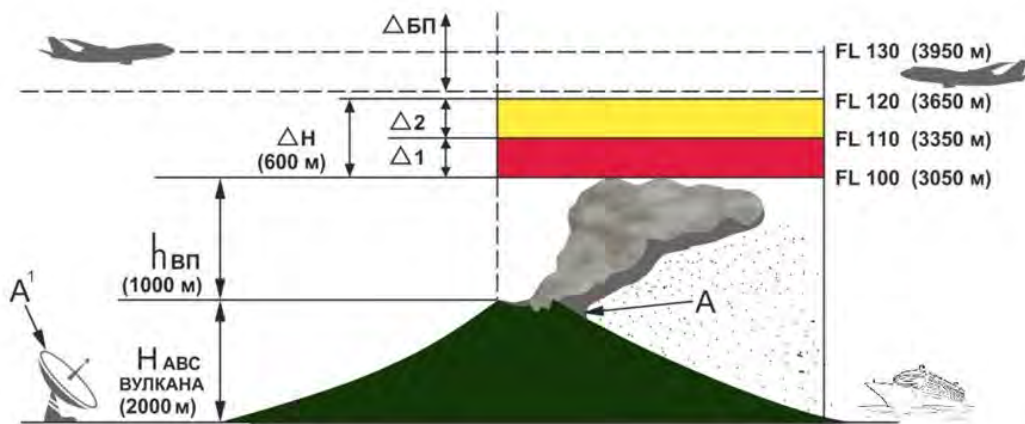


Рис. 4. Модель № 1 – Штатные полёты ВС в районах вулканической деятельности

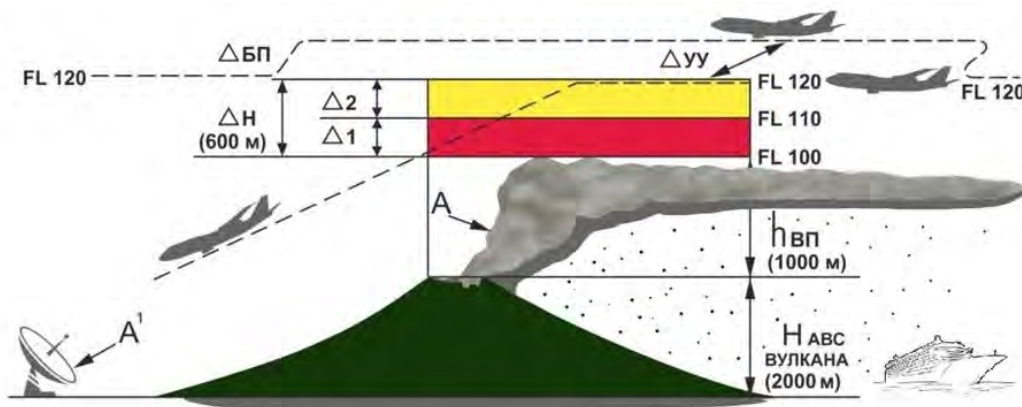


Рис. 5. Модель № 2 – Полёт ВС с уклонением от угрозы (проактивно - в форме командного предупредительного снижения)

Из полученных диаграмм вытекают вполне очевидные рекомендации для командиров ВС на принятие решений по производству полетов в зонах активной вулканической деятельности. Представленные диаграммы могут послужить основой для создания планшетных - графических паспортов безопасности, которые на основе понятий приемлемых и неприемлемых уровне рисков могут помочь оперативно управлять состояниями полетов ВС в зонах активной деятельности вулканов.

Стоит отметить, что проблема безопасности актуальна для морского и речного судоходства, которые рассматриваются в ряде публикаций [8-14], где предлагаются современные методы разработки интеллектуальных систем развития транспортной логистики и различных интерфейсов к ним, что, несомненно, важно. Но, возникают ситуации, когда необходимо осуществлять транспортную деятельность именно в периоды вулканической активности на островных и прибрежных акваториях, где необходимо обеспечить безопасность судоходства, предлагаемые авторами методы

позволяют снизить риски получения негативных последствий при вулканических извержениях.

### Заключение

Показана возможность создания методических рекомендаций по управлению безопасностью полетов ВС в транспортных бизнес-процессах в зонах активного действия вулканов. Представленные диаграммы могут послужить основой для создания планшетных (графических) паспортов безопасности на основе понятий «риск-ориентированного подхода» о приемлемых и неприемлемых уровнях рисков. Эти паспорта могут стать указателями безопасности при оперативном управлении состояниями полетов ВС (или МС) в зонах активной деятельности вулканов. Представленные в статье результаты могут оказаться полезными для Камчатской группы организаций и для некоторых зарубежных представительств, занимающихся изучением геофизической природы вулканической деятельности в акваториях Тихого океана.

### Литература

1. Руководство по управлению безопасностью полетов. ИКАО, Doc. 9859 AN/474 - Изд. 2-е, 2009. – 318 с.
2. Руководство по облакам вулканического пепла, радиоактивных материалов и токсических химических веществ. ИКАО, Doc. 9691 - AN/954. Изд. 3-е, 2015. – 210 с.
3. Безопасность полетов и вулканический пепел. Управление риском при производстве полетов в условиях известного или прогнозируемого загрязнения вулканическим пеплом. ИКАО, Doc. 9974 AN/487 – Изд. 1-е, 2012. - 50 с.
4. Newhall, C.G. and Self, S. (1982). The Volcanic Explosivity Index (VEI): An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87, 1231-1238.
5. Смуров М.Ю., Куклев Е.А., Евдокимов В.Г., Гипич Г.Н. Безопасность полетов воздушных судов с учётом рисков возникновения негативных событий // *Транспорт Российской Федерации*. – 2012. - № 1 (38).
6. Кирьянов В.Ю. Вулканические пеплы Камчатки как источник потенциальной опасности для пассажирских авиалиний // *Вулканология и сейсмология*. 1992. № 3. С. 16-36.
7. Земцов А.Н., Тронь А.А., Мархинин Е.К. Об электрических разрядах в пеплово-газовых тучах, возникающих при вулканических извержениях. *Бюллетень вулканологических станций*. № 52, М. Наука, 1976. С. 18 – 23.
8. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2019/03/19/796814-spg-terminala-novateka>.
9. Ya.Seliverstov, I. Malygin, S. Seliverstov, M. Silnikov, R. Muksimova, G. Gergel, V. Chigur, Sh. Fahmi. *Mobile Technologies in Intelligent Transportation Systems. Convergent 2018, CCIS 1140*, pp. 1–8, 2020.
10. Seliverstov S.A., Seliverstov Y.A., Tarantsev A.A., Grigoriev V.A., Elyashevich A.M., Muksimova R.R. Elaboration of intelligent development system of megalopolis transportation. In: *Proceedings of 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS), CTS 2017*. 2017. p.211-215.
11. 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.
12. 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. 126-130.
13. Seliverstov Ya.A., Seliverstov Sv.A., Komashinskiy V.I., Tarantsev A. A., Shatalova N.V., Grigoriev V.A. Intelligent systems preventing road traffic accidents in megalopolises in order to evaluate. In: *Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017*. p.489-492.
14. Seliverstov Y.A., Malygin I.G., Komashinskiy V.I., Tarantsev A.A., Shatalova N.V., Petrova V.A. The St. Petersburg transport system simulation before opening new subway stations. In: *Proceedings of 2017 20-th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017*. p. 284-287.

### References

1. Safety Management Manual (SMM). ICAO Doc. 9859 – AN/474, Second Edition – 2009.
2. Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemical Clouds. ICAO, Doc. 9691 - AN/954, Third Edition – 2015.
3. Flight safety and volcanic ash. Risk management of flight operations with known or forecast volcanic ash contamination. ICAO Doc 9974 – AN/487 First Edition - 2012.
4. Newhall, C.G. and Self, S. (1982). The Volcanic Explosivity Index (VEI): An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87, 1231-1238.
5. Smurov M.Y., Kuklev E.A., Evdokimov V.G., Hipich G.N. Aircraft Safety, taking into account the risks of negative events. *Transport of the Russian Federation*. - 2012. - No. 1 p. (38-44).

6. Kiryanov V.Y. Volcanic ash of Kamchatka as a source of potential danger to passenger airlines // Volcanology and seismology. 1992. No.3. p. (16-36).
7. Semtsov A.N., Throne A.A., Marchinin E.K. On electrical discharges in ash-gas clouds arising from volcanic eruptions. Bulletin of volcanic Stations. №52, M.: «Science», 1976, p.18-23.
8. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2019/03/19/796814-spg-terminala-novateka>.
9. Ya.Seliverstov, I. Malygin, S. Seliverstov, M. Silnikov, R. Muksimova, G. Gergel, V. Chigur, Sh. Fahmi. Mobile Technologies in Intelligent Transportation Systems. Convergent 2018, CCIS 1140, pp. 1–8, 2020.
10. Seliverstov S.A., Seliverstov Y.A., Tarantsev A.A., Grigoriev V.A., Elyashevich A.M., Muksimova R.R. Elaboration of intelligent development system of megalopolis transportation. In: Proceedings of 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS), CTS 2017. 2017. p.211-215.
11. 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.
12. 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. 126-130.
13. Seliverstov Ya.A., Seliverstov Sv.A., Komashinskiy V.I., Tarantsev A. A., Shatalova N.V., Grigoriev V.A. Intelligent systems preventing road traffic accidents in megalopolises in order to evaluate. In: Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017. p.489-492.
14. Seliverstov Y.A., Malygin I.G., Komashinskiy V.I., Tarantsev A.A., Shatalova N.V., Petrova V.A. The St. Petersburg transport system simulation before opening new subway stations. In: Proceedings of 2017 20-th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017. p. 284-287.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Евгений Алексеевич Куклев**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, 196210, г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д.38, e-mail: [ekuklev@mail.ru](mailto:ekuklev@mail.ru)

**Evgeny A. Kuklev**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Head of the Department of Mechanics, St. Petersburg State University of Civil Aviation, 196210, St. Petersburg, St. Pilots, 38, e-mail: [ekuklev@mail.ru](mailto:ekuklev@mail.ru)

**Геннадий Михайлович Петухов**, начальник отдела инспектирования и контроля качества аэронавигационного обслуживания, ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», филиал «Камчатчаэронавигация», 684000, Камчатский край, г. Елизово, ул. Мурманская, д.2, e-mail: [gena22007@gmail.com](mailto:gena22007@gmail.com)

**Gennady M. Petukhov**, Leading Researcher, Kamchatskii State Corporation Department of Traffic Control, 684000, Elizovo city of Kamchatka region, Murmanskay st., 2, e-mail: [gena22007@gmail.com](mailto:gena22007@gmail.com)

УДК 629.12.001.2  
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.010

## Интеллектуальные технологии для поддержки принятия управленческих решений в сфере экологической безопасности транспорта в больших городах-портах

О.В. Ложкина<sup>1,2</sup>, Г.Г. Рогозинский<sup>1,3</sup>, В.Н. Ложкин<sup>2</sup>, И.Г. Малыгин<sup>1,2</sup>, В.И. Комашинский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, <sup>2</sup>Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, <sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

**Аннотация.** Цель настоящей работы заключалась в разработке основ обеспечения экологически устойчивого развития транспортных систем городов-портов на базе инновационных наукоемких информационных и коммуникационных технологий на примере разработки расчетного метода мониторинга и прогнозирования негативного воздействия выбросов автотранспорта, морских и речных судов на качество воздушной среды. В статье представлена информационная технология поддержки принятия решений на основе модифицированной мультидоменной инфокоммуникационной модели и иерархической модели, позволяющая описать взаимодействие объектов физического, информационного (кибернетического) и когнитивного уровней в области экологического мониторинга и прогнозирования воздействия автомобильного и водного транспорта через набор унифицированных терминов. Эффективность предложенного подхода проиллюстрирована разработкой расчетной модели контроля и прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха в зонах одновременного воздействия автомобильного и водного транспорта в крупных портовых городах, таких как Санкт-Петербург, Владивосток и Севастополь. Модель выстраивалась по принципу иерархичности: индивидуальные транспортные средства, образуемые ими площадные (например, совокупность судов в порту) и линейные (автотранспортные потоки) источники выбросов на локальной городской территории (микрорайон или район города) или в городе в целом. Подобная модель может быть интегрирована в виде «экологического блока» в городскую интеллектуальную транспортную систему для проведения расчетного мониторинга и прогнозирования качества воздуха, что особенно актуально в крупных городах с развитой мультимодальной транспортной инфраструктурой и высокой транспортной нагрузкой.

**Ключевые слова:** интеллектуальные технологии, мультидоменные и иерархические модели, речные и морские круизные суда, автомобильный транспорт, загрязнение окружающей среды.

## Smart technologies for decision-support in the management of environmental safety of transportation in big port cities

Olga V. Lozhkina<sup>1,2</sup>, Gleb G. Rogozinsky<sup>1,3</sup>, Vladimir N. Lozhkin<sup>2</sup>, Igor G. Malygin<sup>1,2</sup>, Vladimir I. Komashinsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Science, Russian Federation, <sup>2</sup>St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, <sup>3</sup>The Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications

**Abstract.** The presented research focuses on developing the foundations for ensuring the environmentally sustainable development of transport systems of port cities based on innovative high-tech information and communication technologies, using the example of developing a calculation method for monitoring and predicting the negative impact of emissions from vehicles, sea and river vessels on the quality of the air environment. The paper presents the information technology for decision support based on a modified multi-domain infocommunications model and hierarchical model, which allows to describe the interaction of physical, informational (cybernetic) and cognitive levels in the field of environmental monitoring and forecasting the impact of automobile and water transport through a set of unified terms. The effectiveness of the proposed approach is illustrated by the development of a calculation model for monitoring and predicting atmospheric air pollution in areas of simultaneous impact of road and water transport in large port cities such as St. Petersburg, Vladivostok and Sevastopol. The model features hierarchical approach: individual vehicles and vessels, corresponding areal (e.g. ships in the port) and linear (transport flows) emission sources in a local urban area (a city block or a city district) or in the city as a whole. Such a model can be integrated as an "environmental block" into the city intelligent transport system for the monitoring and forecasting of air quality, this is especially important in large cities with a developed multimodal transport infrastructure and high traffic.

**Keywords:** intelligent technologies, multi-domain and hierarchical models, river and marine cruise ships, road transport, environmental pollution.

### Введение

Химическое загрязнение воздушной среды опасными компонентами, содержащимися в отработавших газах энергетических установок автотранспортных средств, речных и морских судов, является серьезной проблемой для крупных городов-портов России и мира [1-8].

Особенностью развития методологических подходов экспериментально-расчетного инструментария для контроля и прогнозирования негативного воздействия разных видов транспорта на окружающую среду и человека в нашей стране являлась изначальная декомпозиция общего процесса: каждый уровень детализации развивался самостоятельно и обеспечивался своим комплексом методов, методик и моделей [9-12]. На современном



уровне развития транспортной деятельности в городах, сопровождающейся ростом численности транспортных средств разной модальности, объемов частных и коммерческих перевозок всеми видами транспорта и, как следствие, увеличением опасного прессинга на среду обитания, требуется разработка комплексного метода экологического мониторинга транспортных систем на единой информационной и коммуникационной платформе, что особенно актуально в контексте интеграции экологического блока в интеллектуальные транспортные системы [13-15].

Современные информационные и телекоммуникационные технологии, физические и виртуальные сенсорные сети, киберфизические и встраиваемые системы обеспечивают новый подход к разработке методов мониторинга состояния окружающей среды, хотя использование новых технологий требует их адаптации к комплексу уже существующих теоретических и практических знаний, а также моделей взаимодействия различных элементов системы мониторинга.

Цель настоящей работы заключается в разработке основ обеспечения экологически устойчивого развития транспортных систем городов-портов на базе инновационных наукоемких информационных и коммуникационных технологий на примере разработки расчетного метода мониторинга и прогнозирования негативного воздействия выбросов автотранспорта, морских и речных судов на качество воздушной среды.

### 1. Модели и методы информационных и коммуникационных процессов мониторинга экологической обстановки в зонах влияния транспорта

В контексте развития интеллектуальных транспортных систем (ИТС) основными функциями, которые они призваны реализовать, являются интеллектуальный сбор данных, реализация бесконтактных электронных платежей, интеграция в общий информационный слой умных городов, мониторинг и управление мультимодальными перевозками, коммуникационные функции, обеспечение различных задач в случае чрезвычайных событий, учет и контроль происшествий, приоритизация спецтранспорта и интеллектуальный контроль экологической безопасностью. Подобный сложный комплекс многоуровневых задач требует соответствующего инструмента моделирования, описания и формализации внутри- и внешнесистемного взаимодействия.

В качестве фундаментальной основы для описания и анализа проблемы предлагается использовать *доменную модель инфокоммуникаций*, позволяющую формально описать процессы информационного взаимодействия, обслуживаемые соответствующими интерфейсами участников процесса [16-18].

Рассматриваемая модель предполагает разделение пространства взаимодействия на три уровня (домена), каждый из которых связан с группами объектов общей природы – «физическими», «информационными» и «когнитивными». На границах доменов реализуются соответствующие интерфейсы, позволяющие

осуществлять информационное взаимодействие составляющих систему элементов. Доменная модель инфокоммуникаций обеспечивает общую методологию, включающую как методы формального описания физических, кибернетических и киберфизических процессов, так и способы количественного анализа параметров и характеристик используемых систем.

Еще одна модель – *иерархическая* – позволяет логически декомпозировать рассматриваемые моды транспорта на несколько вложенных взаимосвязанных уровней: индивидуум, индивидуальное транспортное средство, транспортный поток, транспортно-коммуникационный путь, микрорайон, район города, город в целом. Каждый последующий уровень системы является надмножеством предыдущих, аккумулируя соответствующие им экологические проблемы и добавляя свои собственные.

Верхний уровень модели аккумулирует негативные факторы всех предыдущих уровней.

Подсистема  $M$   $i$ -го уровня иерархии  $\xi_M^i$  образует вектор из  $N(M)$  классов различных воздействий  $(\chi_1^i, \chi_2^i, \dots, \chi_{N(M)}^i)$

$$\xi_M^i = (\chi_1^i, \chi_2^i, \dots, \chi_{N(M)}^i)$$

Верхний уровень  $\xi^{i+1}$  модели аккумулирует негативные факторы всех предыдущих уровней:

$$\xi^{i+1} = \sum_{M=1}^K \xi_M^i$$

Данная модель позволяет разделять уровни и контролировать глубину экологического мониторинга, локализовать основные очаги экологических нарушений [19-20].

Комплекс инфотелекоммуникационных технологий позволяет осуществлять автоматизированное управление объектами, сбор данных, их обработку и анализ, облачное хранение.

Через человеко-машинные интерфейсы агрегированные данные поднимаются на когнитивный уровень, где персонал ситуационных центров, надзорные органы, эксперты имеет возможность в режиме on-line наблюдать за экологическим состоянием с варьируемой глубиной погружения в экотранспортную иерархию.

Реализация рассмотренных моделей привела к формированию методологии комплексного расчетного мониторинга и прогнозирования загрязнения воздуха транспортом разной модальности.

### 2. Реализация комплексного расчетного мониторинга и прогнозирования загрязнения воздуха в городах-портах Санкт-Петербурге, Владивостоке и Севастополе двигателями судов и автотранспортных средств

#### 2.1. Характеристика автомобилей, речных и морских судов как источников выбросов опасных загрязняющих веществ в атмосферу

Результаты многолетнего анализа качества среды обитания в городах-портах свидетельствуют о значимой роли транспортных выбросов в формировании повышенных концентраций примесных компонентов в воздухе. К приоритетным загрязнителям, выделяющимся с отработавшими газами двигателей внутреннего сгорания

автомобилей и судов, относятся оксиды азота (NO<sub>x</sub>), CO, SO<sub>2</sub>, взвешенные частицы PM<sub>10</sub> и PM<sub>2.5</sub>. Автотранспортные потоки относятся к неорганизованным наземным источникам выбросов, распространение загрязняющих веществ от которых происходит на уровне дыхания людей, что особенно опасно. Речные и морские суда представляют собой точечные неорганизованные источники выбросов, речные круизные суда и морские круизные суда с высотой устья труб менее 50 м относятся к низким источникам, более – к высоким.

В отличие от автотранспортных средств, двигательные установки судов не только обеспечивают их движение, но и поддерживают системы жизнеобеспечения судов, в т.ч. во время стоянок.

Для расчета ежегодных валовых выбросов поллютантов и для оценки локального загрязнения воздушной среды в качестве базовых данных используются усредненные удельные выбросы загрязняющих веществ учетных категорий транспортных средств. В табл. 1 и 2 представлены соответственно экспериментально полученные удельные выбросы NO<sub>x</sub> и SO<sub>2</sub> для некоторых круизных лайнеров, посещающих порты Российской Федерации [8], и NO<sub>x</sub> и CO для активно эксплуатируемых речных круизных судов проектов 92-016, 301 и 302 («четырепалубников») [7].

Таблица 1

**Усредненные удельные выбросы оксидов азота (NO<sub>x</sub>) и диоксида серы (SO<sub>2</sub>) пассажирскими морскими судами (круизными лайнерами)**

Круизный лайнер	Удельные выбросы, г/с	
	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>
Serenade of the Seas	10,01	0,625
Celebrity Constellation	13,38	9,375
Sapphire Princess	34,13	26,25
Diamond Princess	40,17	56,63
Costa Magica	23,13	30,625
Rotterdam	19,00	12,5
Zuiderdam	27,50	22,5
Queen Elizabeth	26,25	24,375
Disney Magic	39,375	55,625

Таблица 2

**Усредненные удельные выбросы оксидов азота (NO<sub>x</sub>) и угарного газа (CO) пассажирских речных судов 92-016, 301 и 302 проектов**

Тип речного теплохода	Удельные выбросы, г/с (режим работы P <sub>e</sub> /P <sub>eн</sub> – 50 %)	
	NO <sub>x</sub>	CO
Проект 92-016	3,1	0,68
Проекты 301, 302	3,00	0,4

Удельные показатели выбросов для автомобилей обобщены в ГОСТ Р 56162-2014 «Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Метод расчета выбросов от автотранспорта при проведении сводных расчетов для городских населенных пунктов».

**2.2. Анализ числа судозаходов пассажирских судов и интенсивности движения автотранспорта вблизи пассажирских портов в Санкт-Петербурге, Владивостоке и Севастополе**

В качестве объектов исследования были выбраны районы пассажирских портов Санкт-Петербурга (Морской фасад и Уткина заводь), Севастополя (Графская пристань) и Владивостока (Морской вокзал). Особенностью всех этих городов является то, что пассажирские порты расположены в жилых районах.

Данные о числе судозаходов пассажирских круизных судов представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Число судозаходов морских и речных круизных судов в города-порты Санкт-Петербург, Владивосток, Севастополь**

Севастополь			
Год	2011	2012	2013
Число судозаходов МПС*	38	39	52
Владивосток			
Год	2017	2018	2019
Число судозаходов МПС*	14	14	16
Санкт-Петербург			
Год	2017	2018	2019
Число судозаходов МПС*	249	270	265
Число судозаходов РПС**	≈180	≈200	≈200

Примечание: \*МПС – морские пассажирские суда; \*\*РПС – речные пассажирские суда.

В табл. 4-6 отражены результаты обследования автотранспортных потоков (АТП) на автомагистралях вблизи пассажирских портов: на Западном скоростном диаметре Санкт-Петербурга и ул. Кораблестроителей вблизи пассажирского порта «Морской фасад Санкт-Петербурга», на Большом Обуховском мосту вблизи речного пассажирского порта Санкт-Петербурга, на Светланской м. Верхнепортовой ул. вблизи морского пассажирского вокзала Владивостока, на ул. Нахимова и Ленина в центре Севастополя.

В табл. 4-6 используются следующие обозначения: Л – легковые автомобили, АМ – автофургоны и микроавтобусы, Г<sub>≤12</sub> – грузовые автомобили менее 12 т, Г<sub>>12</sub> – грузовые автомобили более 12 т, А<sub>>3.5</sub> – автобусы более 3.5 т.

Таблица 4

Интенсивность движения автотранспорта на автомагистралях вблизи морского и речного портов Санкт-Петербурга

Категория АТС	Интенсивность движения АТС, авт/ч	Средняя скорость движения, км/ч
<b>ЗСД (вблизи пассажирского порта «Морской фасад Санкт-Петербурга»)</b>		
Л	3559	100
АМ	268	100
Г <sub>≤12</sub>	142	80
Г <sub>&gt;12</sub>	134	80
А <sub>&gt;3.5</sub>	127	80
<b>Ул. Кораблестроителей (вблизи пассажирского порта «Морской фасад Санкт-Петербурга»)</b>		
Л	3425	60
АМ	454	60
Г <sub>≤12</sub>	44	40
Г <sub>&gt;12</sub>	12	40
А <sub>&gt;3.5</sub>	104	35
<b>Большой Обуховский мост (вблизи речного пассажирского порта Санкт-Петербурга)</b>		
Л	9915	70
АМ	1668	70
Г <sub>≤12</sub>	189	60
Г <sub>&gt;12</sub>	1525	60
А <sub>&gt;3.5</sub>	80	60

Таблица 5

Интенсивность движения автотранспорта на автомагистралях вблизи пассажирского морского порта Владивостока

Категория АТС	Интенсивность движения АТС, авт/ч	Средняя скорость движения, км/ч
<b>Светланская ул. (вблизи морского пассажирского вокзала г. Владивостока)</b>		
Л	2376	45
АМ	540	45
Г <sub>≤12</sub>	84	30
Г <sub>&gt;12</sub>	124	30
А <sub>&gt;3.5</sub>	112	30
<b>Верхнепортовая ул. (вблизи морского пассажирского порта Владивостока)</b>		
Л	2250	40
АМ	342	40
Г <sub>≤12</sub>	60	30
Г <sub>&gt;12</sub>	7	30
А <sub>&gt;3.5</sub>	83	30

Таблица 6

Интенсивность движения автотранспорта на автомагистралях вблизи Графской пристани Севастополя

Категория АТС	Интенсивность движения АТС, авт/ч	Средняя скорость движения, км/ч
<b>Ул. Ленина (вблизи Графской пристани Севастополя)</b>		
Л	1296	45
АМ	135	45
А <sub>&gt;3.5</sub>	112	30
<b>Ул. Ленина (вблизи Графской пристани Севастополя)</b>		
Л	2250	40
АМ	342	40
А <sub>&gt;3.5</sub>	83	30

Усредненные удельные выбросы загрязняющих веществ и сведения об интенсивности движения были использованы для расчета выбросов от автомобилей и судов в зонах их совместного воздействия.

**2.3. Расчетное прогнозирование загрязнения воздушной среды вблизи пассажирских портов (на примере Санкт-Петербурга, Владивостока и Севастополя)**

Для расчетного прогнозирования загрязнения воздушной среды вблизи пассажирских портов судами и автотранспортом оправдано применение известной к-модели [21], реализованной в программном обеспечении «Эколог». Этот подход позволяет определять опасные концентрации ЗВ при неблагоприятных для рассеивания примесных компонентов метеоусловиях (НМУ).

Максимальное значение приземной концентрации вредного вещества С<sub>м</sub> (мг/м<sup>3</sup>) при выбросе газо-воздушной смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем – дымовая труба судна, – достигается при неблагоприятных метеорологических условиях на расстоянии х<sub>м</sub> (м) от источника и определяется по формуле:

$$C_m = \frac{AMF_{mn}\eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}, \text{ где}$$

С<sub>м</sub> – максимальная разовая концентрация ЗВ на удалении х<sub>м</sub> от источника, г/м<sup>3</sup>; М – удельный выброс ЗВ в единицу времени, г/с; F – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость седиментации взвешенных частиц с учетом их эффективного диаметра; η – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности на формирование концентрационных полей загрязнителей; n – безразмерный коэффициент, учитывающий геометрические и температурные характеристики источника выброса; А – безразмерный коэффициент, зависящий от стратификации атмосферы; H – высота источника над поверхностью земли, м; ΔT (°C) – разность между температурой выбрасываемой газо-воздушной



смеси  $T_a$  и температурой окружающего атмосферного воздуха  $T_b$ ;  $V_1$  – объем выброса ЗВ от источника в единицу времени,  $m^3/c$ .

Расчет максимальной концентрации загрязняющего вещества ( $C''_M$ ), создаваемой автотранспортными потоками, стилизованными в виде линейного источника выброса, будет производиться по формуле:

$$C''_M = \frac{AMF\eta_1 2LV_1}{8H^{4/3} V_1 (L^2 W_0 + V_1)}, \text{ где}$$

$L$  – протяженность дороги или ее части, м;  $W_0$  – скорость выброса ЗВ от источника, м/с.

Результаты расчетов по прогнозным сценариям для НМУ показали, что наиболее проблемными загрязняющими компонентами являются оксиды азота, диоксид серы и взвешенные частицы. На рис. 2 представлены карты загрязнения воздуха диоксидом азота вблизи морских пассажирских портов Севастополя (а), Владивостока (б) и Санкт-Петербурга (в).

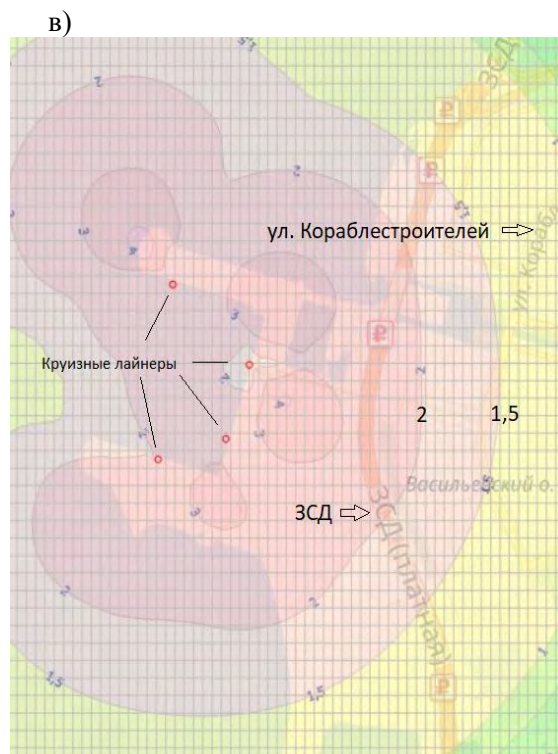
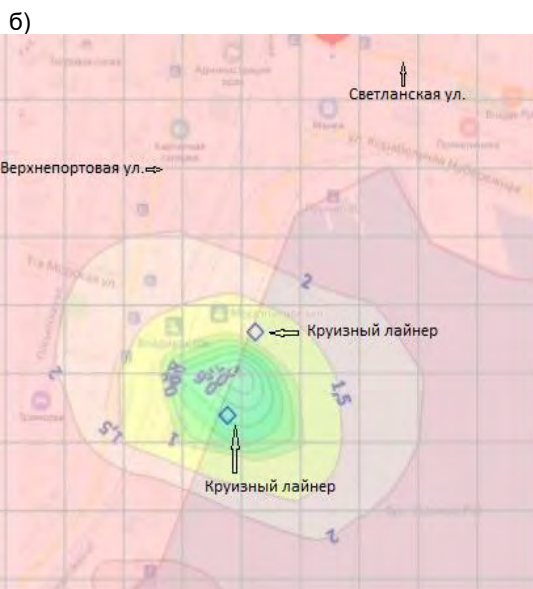
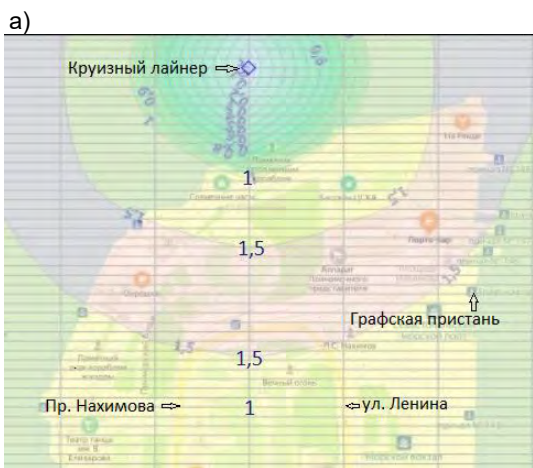


Рис. 1 Карты загрязнения воздуха диоксидом азота от двигательных установок круизных судов в микрорайонах вблизи морских пассажирских портов а) Севастополя – по сценарию, когда один лайнер типа Costa Magica готовится к отправке в рейс; б) Владивостока – по сценарию, когда два круизных судна типа Westerdam и Costa NeoRomantica готовятся к отправке в рейс; в) Санкт-Петербурга – по сценарию, когда четыре круизных лайнера (типа Celebrity Constellation, Sapphire Princess, Costa Magica и Rotterdam) готовятся к отправке в рейс

Расчетные исследования (рис. 2а и 2б) показали, что для относительно высоких горячих источников выбросов (дымовых труб круизных лайнеров) опасная скорость ветра составляет 2-5 м/с, а максимальные концентрации загрязняющих веществ формируются не прямо у источника, а на некотором удалении – в зависимости от его высоты и мощности выброса. Прогнозные значения превышения ПДК диоксида азота, обусловленного выбросами судов, при НМУ составили до 1,5 ПДК в Севастополе (рис. 2а) и 1,5-2,0 ПДК во Владивостоке.

По результатам расчетов в Санкт-Петербурге возможное превышение ПДК диоксида азота при максимальной загрузке морского пассажирского порта и при НМУ может составить 1,5-3,0 ПДК вблизи порта, однако в районе жилой застройки – не более 1,0-1,3 ПДК. Загрязнение воздуха в микрорайоне «Морской фасад», в основном, связано с выбросами от автотранспортных потоков на ЗСД и ул. Кораблестроителей. Опасная скорость ветра для наземных холодных источников, к которым относится автотранспорт, составляет 0,5-2 м/с, а максимальные концентрации загрязняющих веществ формируются непосредственно у источников выброса и могут достигать при высокой интенсивности движения на ЗСД (~ 4000 авт/ч) и на ул. Кораблестроителей (~ 4200 авт/ч) 2-4 ПДК по  $NO_2$  в близлежащих жилых кварталах при НМУ.



На рис. 3 представлена карта загрязнения атмосферного воздуха в микрорайонах вблизи Большого Обуховского моста и речного пассажирского терминала в Уткиной заводи.



Рис. 2. Карты загрязнения воздуха диоксидом азота в микрорайоне «Уткина заводь» Санкт-Петербурга отработавшими газами двигательных установок речных круизных теплоходов и автотранспорта.

Проведенные расчеты показали, что в при НМУ в периоды максимальной транспортной нагрузки, например, в пятницу вечером с 18.00 до 22.00 в летний сезон, когда интенсивность движения на этом участке КАД превышает 13000 авт/ч и поочередно отправляются в рейс до десяти круизных теплоходов, непосредственно в пределах санитарно-защитной зоны порта концентрации диоксида азота могут достигать пятикратного превышения относительно нормативных значений, а на КАД – десятикратного. В то же время и жилые микрорайоны вблизи пассажирского речного порта и КАД Санкт-Петербурга могут подвергаться краткосрочному опасно высокому загрязнению воздуха оксидами азота с превышением ПДК по  $\text{NO}_2$  до 5 раз.

### Заключение

Применение информационных технологий в сфере обеспечения экологической безопасности городов имеет важное значение для детальной оценки и прогнозирования загрязнения среды обитания в масштабах всего города, а также для

выявления проблемных зон с опасно высоким уровнем загрязнения.

Очевидно, что качество расчетного прогнозирования, направленного на расчет концентрации вредных веществ, зависит от множества факторов и, в первую очередь, от объема и доступности исходных данных. В отношении транспортного сектора, это - структура и интенсивность движения транспортных потоков, режимы работы двигателей транспортных средств и зависящие от них показатели эмиссии поллютантов, условия рассеивания выбросов, включая метеорологические параметры (температуру воздуха, скорость и направление ветра, стратификацию атмосферы), геометрические характеристики прилегающих зданий, особенности городского ландшафта т.д.

Эффективность информационного процесса расчетного мониторинга и прогнозирования может быть существенно повышена путем его интеллектуализации с привлечением ГИС-технологий и современных информационных и коммуникационных технологий. Мультиязычные человеко-машинные интерфейсы в настоящее время начинают проникать в традиционные комплексы мониторинга. Их применение при соответствующем проектировании тезауруса отображающей специализированной информации, например, о текущем экологическом состоянии группы объектов наблюдения, позволит как снизить нагрузку на человека-оператора, так и повысить эффективность анализа состояния и скорости принятия решений.

В статье представлен успешный пример реализации комплексного расчетного мониторинга и прогнозирования загрязнения воздуха в городах-портах Санкт-Петербурге, Владивостоке и Севастополе двигателями судов и автотранспортных средств в зонах их совместного влияния, построенный на принципе иерархичности, т.е. от единичных транспортных средств – к их совокупности на конкретном участке автодороги, в порту, в микрорайоне. Подобный подход позволяет проводить расчетный мониторинг и прогнозирование качества воздуха, что особенно актуально в случае увеличения транспортной нагрузки и ухудшения погодных условий, т.е. при неблагоприятных транспортно-метеорологических условиях.

### Литература

1. Celic, J., Valcic, S., Bistrovic, M. (2014). Air pollution from cruise ships. Proceedings of the 56th International Symposium ELMAR-2014, 10-12 September 2014, Zadar, Croatia, pp. 75-78.
2. Bencardino, M.M., Pirrone, N.N., Sprovieri F.F. (2014). Aerosol and ozone observations during six cruise campaigns across the Mediterranean basin: temporal, spatial, and seasonal variability. Environ. Sci. Pollut. Res. Int., 21(6), 4044-4062.
3. Wan, Z., Zhang, Q., Xu, Z., Chen, J., Wang, Q. (2019). Impact of emission control areas on atmospheric pollutant emissions from major ocean-going ships entering the Shanghai Port, China. Mar. Pollut. Bull., 142, 525-532.
4. Ruiz-Guerra, I., Molina-Moreno, V., Cortés-García, F.J., Núñez-Cacho, P. (2019). Prediction of the impact on air quality of the cities receiving cruise tourism: the case of the Port of Barcelona. Heliyon. 5(3), e01280. doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01280.
5. Blasco, J., Durán-Grados, V., Hampel, M., Moreno-Gutiérrez, J. (2014). Towards an integrated environmental risk assessment of emissions from ships' propulsion systems. Environ. Int., 66, 44-47.
6. Pesce, M., Terzi, S., Al-Jawasreh, R.I.M. et al. (2018). Selecting sustainable alternatives for cruise ships in Venice using multi-criteria decision analysis. Sci. Total Environ., 642, 668-678.
7. Lozhkin, V.N., Lozhkina, O.V. (2017). Forecast of extreme air pollution by water and road transport in the zone of the cable-slayed bridges of St. Petersburg and Vladivostok. Water and ecology: problems and solutions, 21(3), 133-145.

8. Lozhkin, V.N., Lozhkina, O.V., Seliverstov, S.A., Kripak, M.A. (2020). Forecasting of dangerous air pollution by cruise ships and motor vehicles in the areas of their joint influence in Sevastopol, Vladivostok and St. Petersburg. *Water and ecology: problems and solutions*, 81(1), 38-51.
9. Lozhkin, V.N., Lozhkina, O.V., Dobromirov, V.N. (2018). A study of air pollution by exhaust gases from cars in well courtyards of Saint Petersburg. *Transportation Research Procedia*, 36, 453-458.
10. Lozhkina, O.V., Lozhkin, V.N. (2015). Estimation of road transport related air pollution in Saint Petersburg using European and Russian calculation models. *Transport. Res. Part D*, 36, 178-189.
11. Иванченко, А.А. (2018). Прогнозирование и мониторинг безопасности водного транспорта в эксплуатации. *Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России*, 2, 57-60.
12. Иванченко, А.А. (2018). Снижение чрезвычайного воздействия водного транспорта на атмосферу городской среды. *Проблемы управления рисками в техносфере*, 2 (46), 90-93.
13. Qureshi, K.N., Abdullah, A.H. (2013). A Survey on Intelligent Transportation Systems. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 15 (5), 629-642.
14. Asaul, A., Malygin, I., Komashinskiy, V. (2017). The project of intellectual multimodal transport system. *Transportation Research Procedia*, 20, 25-30.
15. Malygin, I., Duke, V. Comparison of algorithms for recognition of vehicle types by parameters of their silhouettes. *Marine Intellectual Technologies*, 4-4 (42), 197-201.
16. Рогозинский, Г.Г., Комашинский, В.И. (2017). Модифицированная доменная модель мультисенсорного мониторинга киберфизических систем. *Морские интеллектуальные технологии*, 4(38) т. 3, 177-182.
17. Рогозинский, Г.Г. (2017). Мультидоменный подход и модели объектов киберфизического пространства в задачах отображения информации. *Труды учебных заведений связи*, т. 3, № 4, 89-93.
18. Sotnikov, A.D., Rogozinsky, G.G. (2017). The multi domain infocommunication model as the basis of an auditory interfaces development for multimedia informational systems. *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*, т. 11, № 5, 77-82.
19. Ложкина, О.В., Рогозинский, Г.Г., Комашинский, В.И. (2019). Методологические и информационные подходы для мониторинга и прогнозирования воздействия транспорта на окружающую среду в контексте построения интеллектуальных транспортных систем. *Транспорт России: проблемы и перспективы – 2019. Материалы международной научно-практической конференции*, 17-20.
20. Ложкина, О.В., Рогозинский, Г.Г., Крипак, М.Н. (2019). К вопросу о развитии интеллектуальных систем управления экологической безопасностью транспорта в больших городах-портах. *Технологии построения когнитивных транспортных систем. Материалы всероссийской научно-практической конференции*, 153-157.
21. Ložkin, V., Ložkina, O., Ušakov, A. (2013). Using K-theory in geographic information investigations of critical-level pollution of atmosphere in the vicinity of motor roads. *World Applied Science Journal*, 23 (13), 96-100.

#### References

1. Celic, J., Valcic, S., Bistrovic, M. (2014). Air pollution from cruise ships. *Proceedings of the 56th International Symposium ELMAR-2014*, 10-12 September 2014, Zadar, Croatia, pp. 75-78.
2. Bencardino, M.M., Pirrone, N.N., Sprovieri F.F. (2014). Aerosol and ozone observations during six cruise campaigns across the Mediterranean basin: temporal, spatial, and seasonal variability. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 21(6), 4044-4062.
3. Wan, Z., Zhang, Q., Xu, Z., Chen, J., Wang, Q. (2019). Impact of emission control areas on atmospheric pollutant emissions from major ocean-going ships entering the Shanghai Port, China. *Mar. Pollut. Bull.*, 142, 525-532.
4. Ruiz-Guerra, I., Molina-Moreno, V., Cortés-García, F.J., Núñez-Cacho, P. (2019). Prediction of the impact on air quality of the cities receiving cruise tourism: the case of the Port of Barcelona. *Heliyon*. 5(3), e01280. doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01280.
5. Blasco, J., Durán-Grados, V., Hampel, M., Moreno-Gutiérrez, J. (2014). Towards an integrated environmental risk assessment of emissions from ships' propulsion systems. *Environ. Int.*, 66, 44-47.
6. Pesce, M., Terzi, S., Al-Jawasreh, R.I.M. et al. (2018). Selecting sustainable alternatives for cruise ships in Venice using multi-criteria decision analysis. *Sci. Total Environ.*, 642, 668-678.
7. Lozhkin, V.N., Lozhkina, O.V. (2017). Forecast of extreme air pollution by water and road transport in the zone of the cable-slayed bridges of St. Petersburg and Vladivostok. *Water and ecology: problems and solutions*, 21(3), 133-145.
8. Lozhkin, V.N., Lozhkina, O.V., Seliverstov, S.A., Kripak, M.A. (2020). Forecasting of dangerous air pollution by cruise ships and motor vehicles in the areas of their joint influence in Sevastopol, Vladivostok and St. Petersburg. *Water and ecology: problems and solutions*, 81(1), 38-51.
9. Lozhkin, V.N., Lozhkina, O.V., Dobromirov, V.N. (2018). A study of air pollution by exhaust gases from cars in well courtyards of Saint Petersburg. *Transportation Research Procedia*, 36, 453-458.
10. Lozhkina, O.V., Lozhkin, V.N. (2015). Estimation of road transport related air pollution in Saint Petersburg using European and Russian calculation models. *Transport. Res. Part D*, 36, 178-189.
11. Ivanchenko, A. (2018). Forecasting and monitoring of water transport operational safety. *Bulletin of St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia*, 2, 57-60.
12. Ivanchenko, A. (2018). Reduction of emergency effects of water transport on the atmosphere of urban environment. *Problems of technosphere risk management*, 2 (46), 90-93.
13. Qureshi, K.N., Abdullah, A.H. (2013). A Survey on Intelligent Transportation Systems. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 15 (5), 629-642.

14. Asaul, A., Malygin, I., Komashinskiy, V. (2017). The project of intellectual multimodal transport system Transportation Research Procedia, 20, 25-30.
15. Malygin, I., Duke, V. Comparison of algorithms for recognition of vehicle types by parameters of their silhouettes. Marine Intellectual Technologies, 4-4 (42), 197-201.
16. Rogozinsky, G.G., Komashinsky, V.I. (2017). Modified multi domain model of cyber-physical systems monitoring. Marine Intellectual Technologies, 4(38) т. 3, 177-182.
17. Rogozinsky, G.G (2017). Multi-domain approach and models of cyber-physical objects in informational representation systems. Proceedings of Telecommunication Universities, v. 3, № 4, 89-93.
18. Sotnikov, A.D., Rogozinsky, G.G. (2017). The multi domain infocommunication model as the basis of an auditory interfaces development for multimedia informational systems. T-Comm: Telecommunications and Transport, v. 11, № 5, 77-82.
19. Lozhkina, O.V, Rogozinsky, G.G., Komashinsky, V.I. (2019). Methodological and informational approaches for monitoring and forecasting the environmental impact of transport in the context of building intelligent transport systems. Transport of Russia: Problems and Prospects - 2019. Materials of the international scientific and practical conference, 17-20.
20. Lozhkina, O.V, Rogozinsky, G.G., Крыпак, M.N. (2019). To the question of the development of intelligent environmental safety management systems for transport in large port cities. Technologies for building cognitive transport systems. Materials of the All-Russian scientific-practical conference, 153-157.
21. Lozhkin, V., Lozhkina, O., Ushakov, A. (2013). Using K-theory in geographic information investigations of critical-level pollution of atmosphere in the vicinity of motor roads. World Applied Science Journal, 23 (13), 96-100.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ольга Владимировна Ложкина**, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем экологии транспортных систем, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 12 линия В.О., д. 13; профессор кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149, e-mail: olojkina@yandex.ru

**Глеб Гендрихович Рогозинский**, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем экологии транспортных систем, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Россия, Санкт-Петербург, 12 линия В.О., д. 13; начальник НОЦ «Медиацентр», Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, к. 1, e-mail: gleb.rogozinsky@gmail.com

**Владимир Николаевич Ложкин**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149, e-mail: vnlojkin@yandex.ru

**Малыгин Игорь Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, директор, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, В.О., 12 линия, д. 13; профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский пр., 149, e-mail: malygin\_com@mail.ru

**Olga V. Lozhkina**, senior lecturer, Dr.Sci. (Eng), Leading researcher of the Laboratory of environmental problems of transport systems, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; Professor of the Department of chemistry and combustion processes, St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 149, Moskovsky, St. Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: olojkina@yandex.ru

**Gleb G. Rogozinsky**, senior lecturer, Ph.D. (Eng), Leading researcher of the Laboratory of environmental problems of transport systems, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; Head of medialabs, The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications, 22, Bolshevnikov, St. Petersburg, 193232, Russian Federation, e-mail: gleb.rogozinsky@gmail.com

**Vladimir N. Lozhkin**, professor, Dr.Sci. (Eng), Professor of the of the Department of fire, emergency, rescue equipment and vehicles, St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 149, Moskovsky, St. Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: vnlojkin@yandex.ru

**Igor G. Malygin**, professor, Dr.Sci. (Eng), Director, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, Professor of the Department of firefighting and rescue operations, St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 149, Moskovsky, St. Petersburg, 196105, Russian Federation, e-mail: malygin\_com@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, Россия, Санкт-Петербург, 12 линия В.О., д. 13, e-mail: kama54@rambler.ru

**Vladimir I. Komashinsky**, senior lecturer, Dr.Sci. (Eng), Deputy Director, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of sciences, 12 Line V.O., 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: kama54@rambler.ru



УДК 621.391.26, 004.627, 932.  
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.011

## Адаптивное спектральное кодирование изображений в системах видеонаблюдения

Е.В. Костикова<sup>1</sup>, Ш.С. Фахми<sup>2,3,4</sup>, Я.М. Хасан<sup>3</sup>, С.А. Селиверстов<sup>2</sup>, А.В. Соболев<sup>5</sup>,  
Н.В. Подопригора<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, <sup>2</sup>Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, <sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), <sup>4</sup>Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС РФ, <sup>5</sup>Санкт-Петербургский горный университет, <sup>6</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

**Аннотация.** Предложенный метод основан на использовании адаптивного косинусного преобразования в пространстве сигнала и по времени, и отличается произвольными размерами кубов в зависимости от пространственных и временных статистических характеристик сигнала изображений. Полученные результаты реализации предложенного метода в виде количества операции умножений и сложений двоичных данных. Предложен метод кодирования и декодирования изображений транспортной специфики, полученных из различных камер видеонаблюдения. Метод, основан на использовании адаптивного трехмерного дискретного косинусного преобразования, включающегося процедуры квантования, упорядочивания, адаптивного сканирования трансформант дискретного косинусного преобразования и энтропийного кодирования для передачи по каналу связи. Сжатие видеопоследовательностей, как правило, преследует две цели: уменьшить пространственную избыточность между пикселями изображения с учетом внутрикадровой корреляции и временную избыточность между последовательными кадрами с учетом межкадровой корреляции. Известные, на сегодняшний день все стандартны кодирования видео (H. 26-x и MPEG-x.) для снижения избыточности по времени используют принцип предсказания и компенсации движения по интерполированным позициям сэмплов в опорном кадре путём формирования векторов движения для предсказания кадров между опорными кадрами исходной видео последовательности. Реализация предложенного метода адаптивного косинусного преобразования в пространстве сигнала и по времени выполнена с использованием математического аппарата тригонометрических функций, позволяющих сократить общее число операции умножений и сложений, при этом рассмотренный метод отличается от известных стандартов произвольными размерами кубов в зависимости от пространственных и временных статистических характеристик сигнала изображений. Полученные результаты моделирования алгоритмов предложенного метода косинусного преобразования для размеров видео кубов (8x8, 16x16, .512x512) в виде количества операций умножений и сложений двоичных данных по сравнению с алгоритмами построчно- столбикового преобразования и векторно-радика.

**Ключевые слова:** адаптивное косинусное преобразование, сложность кодирования, кодирование, сложение, умножение.

## The fast algorithm of spectral transformation of images in video surveillance systems

Elena V. Kostikova<sup>1</sup>, Shakeeb S. Fahmi<sup>2,3,4</sup>, Yazeed A.A. Hasan<sup>3</sup>, Svyatoslav A. Seliverstov<sup>2</sup>, Artem V. Sobolev<sup>5</sup>, Nikolay V. Podoprigora<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Russian Federation, <sup>2</sup>Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, <sup>3</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Russian Federation, <sup>4</sup>Saint-Petersburg university of State fire service Emercom of Russia, Russian Federation, <sup>5</sup>Mining university, Russian Federation, <sup>6</sup>Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Russian Federation

**Abstract.** The proposed method is based on the use of adaptive cosine transform in the signal space and time, and differs in arbitrary cubic sizes depending on the spatial and temporal statistical characteristics of the image signal. The obtained results of the implementation of the proposed method in the form of the number of operations of multiplications and additions of binary data. A method for encoding and decoding transport-specific images obtained from various surveillance cameras is proposed. The method is based on the use of adaptive three-dimensional discrete cosine transform, including quantization, ordering, adaptive scanning transformants of the discrete cosine transform and entropy coding for transmission over the communication channel. Compression of video sequences, as a rule, has two objectives: to reduce spatial redundancy between image pixels with regard to intra-frame correlation and temporary redundancy between consecutive frames with regard to inter-frame correlation. Well-known, today all standard video coding (H. 26s and MPEG-x.) To reduce time redundancy use the principle of prediction and motion compensation for the interpolated positions of samples in the reference frame by forming motion vectors to predict frames between the reference frames of the original video sequences. Implementation of the proposed method of adaptive cosine transform in the signal space and time is performed using the mathematical apparatus of trigonometric functions that reduce the total number of operations of multiplications and additions, while the considered method differs from the known standards in arbitrary cubic sizes depending on the spatial and temporal statistical characteristics of the image signal. The obtained simulation results of the algorithms of the proposed cosine transform method for the size of video cubes (8x8.16x16, ..512x512) in the form of the number of operations of multiplications and additions of binary data in comparison with row-by-column transform and vector-radix algorithms.

**Keywords:** the discrete cosine transform, transmission complexity, compression and recovery, addition, multiplication.

**Введение**

С момента введения спектрального подхода в обработке изображений в 1974 году [1], в широком диапазоне было применено одномерное дискретное косинусное преобразование (1D-ДКП<sup>1</sup>), поскольку ДКП статистически очень близок к оптимальному преобразованию Каронена–Лоэва [2]. Преимуществом ДКП, с точки зрения эффективности, является его высокая производительность при реализации устройств кодирования и декодирования изображений. Широкое применение ДКП также получило при разработке различных видео и мультимедийных приложений [3]. Кроме того ДКП был принят в качестве стандартов сжатия JPEG, H.26-x и MPEG-x [4]. Это привело к разработке большого количества быстрых алгоритмов для быстрого вычисления ДКП и аппаратной реализации одномерных (1D) и двумерных (2D) ДКП.

Алгоритмы можно разделить на прямые и косвенные. Прямые алгоритмы, как правило, имеют регулярную вычислительную структуру, что снижает сложность реализации [5]. Косвенные алгоритмы используют связь между ДКП и другими преобразованиями. Эти алгоритмы включают вычисление ДКП с помощью быстрого Фурье [6], Хартли [7] и полиномиальных преобразований [8].

Перечисленные выше алгоритмы имеют нерегулярные структуры и сложные схемы индексирования. Хотя многие из них были разработаны для быстрого вычисления 1D и 2D ДКП [9]. А также были реализованы алгоритмы для многомерного дискретного косинусного

преобразования (MD-ДКП), в частности трехмерное ДКП (3D-ДКП), на основе рекурсивного выполнения процедуры преобразования (Строка-Столбец-Кадр) (ССК) и отображения её в 1D преобразование [10].

В связи с быстрым ростом числа трехмерных приложений, основанных на 3-D ДКП [11], в настоящее время существует большая потребность в разработке быстрых алгоритмов для вычисления и реализации устройств 3-D ДКП кодирования изображений. Следовательно, в данной работе предложен эффективный алгоритм быстрого вычисления 3-D ДКП.

В связи с совершенствованием программного обеспечения, аппаратных средств и внедрением новых процессоров высокой частоты (3ГГц и более) предложено много новых приложений на основе 3-D ДКП [12]. Эти приложения включают гиперспектральные системы кодирования [32], 3-D ДКП кодирование переменной временной длины [13], алгоритмы кодирования видео [14], адаптивное кодирование видео [15] и 3-D сжатие [16] и др.

Поскольку 3-D ДКП является сепарабельным, то вычисляется путем последовательного применения 1-D быстрых алгоритмов над строками, столбцами, а затем кадрами на основе ССК процедуры. Другие быстрые алгоритмы были разработаны для снижения вычислительных затрат на 3D-ДКП [17].

Общим для всех этих алгоритмов является то, что они используют связь между ДКП и другими преобразованиями, такими как преобразования Фурье, Хартли и полиномиальные вычисления 3D ДКП [18,19].

Исходное видео



Восстановленное видео



Рис. 1. Процесс кодирования и декодирования морских изображений

В данной работе для быстрого расчета 3DДКП разработан новый метод реализации 3D-ДКП, на основе векторно-радика (ВР) (англ. vector-radix) и алгоритма децимации в частотной области сигнала. В работе показаны все этапы вычисления ДКП, арифметическая сложность и время работы компьютера [20,21]. Из числа арифметических операций показано, что 3D-ДКП-ВР алгоритм требует существенно меньшего количества умножений по

сравнению с известным подходом построчно-столбцевого алгоритма (ПСА) ДКП

**1. Адаптивное спектральное кодирование изображений**

Алгоритмы 3D-ДКП-ВР был применен для быстрого вычисления многомерных преобразований, таких как дискретные преобразования Фурье [28] и

<sup>1</sup> В АО «НИИ Телевидение» г. Санкт-Петербург были проведены исследования и разработаны кодеки, на основе ДКП-3D с

использованием технологии «система на кристалле» и современных САПР на их основе.

Хартли [29]. Они также были использованы для быстрого расчета 2-D ДКП [30] и 3-D ДКП [31]. Эти алгоритмы имеют дело с данными в виде многомерного массива и вычисляют ДКП напрямую, в то время как знакомый подход ПСА использует алгоритмы, разработанные для вычисления 1-D преобразований для вычисления многомерных преобразований.

Прямые алгоритмы многомерного сигнала оказываются более эффективными и быстрыми, чем подход ПСА [31]. В этом разделе, с целью быстрого 3-D сжатия видео приложений, 3-D ВР DIF алгоритм разработан и проанализирован для 3-D ДКП-II.

**А) Математический аппарат быстрого 3D-ДКП**

Для простоты выполнения операции умножения на коэффициент нормализации  $(8/N_3)$ , коэффициент  $(\epsilon_{k1} \epsilon_{k2} \epsilon_{k3})$  можно пренебречь или отложить до последнего этапа. Размер преобразования  $N \times N \times N$  предполагается равным степени  $2 \times 2 \times 2$  для применения алгоритма вектор-радиус.

Входные данные  $x(n_1, n_2, n_3)$  должны быть переупорядочены в соответствии с отображением индекса следующим образом [13], [22,23].

Кроме того, основываясь на времени работы компьютера, он оказывается быстрее (около 70% для  $8 \times 8 \times 8$  3D-ДКП), чем подход ПСА. Кроме того, он имеет регулярную структуру бабочки, что делает его пригодным для программных и аппаратных реализаций [24,25].

**Прямое и обратное 3-D ДКП.**

Процесс кодирования и декодирования морских видеосюжетов включает следующие процедуры (рис. 1) трехмерное ДКП, квантование и упорядочивание трансформант ДКП, адаптивное сканирование трансформант ДКП и энтропийное кодирование для передачи по каналу связи. А процесс деодирования видеосюжетов включает те же процедуры, только в обратном порядке.

**Прямое 3D ДКП.**

Прямое 3D-ДКП выполняется над элементами видеoinформации  $X(k_1, k_2, k_3)$  с размером  $N \times N \times N$  по следующей формуле [26,27]:

$$X(k_1, k_2, k_3) = \frac{8}{N^3} \epsilon_{k1} \epsilon_{k2} \epsilon_{k3} \sum_{n_1=0}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{N-1} \sum_{n_3=0}^{N-1} x(n_1, n_2, n_3) \times \cos\left(\frac{\pi}{2N}(2n_1+1)k_1\right) \times \cos\left(\frac{\pi}{2N}(2n_2+1)k_2\right) \times \cos\left(\frac{\pi}{2N}(2n_3+1)k_3\right) \quad (1)$$

где  $k_1, k_2, k_3 = 0, 1, 2, \dots, N-1$ , а  $x(n_1, n_2, n_3)$  - яркость пикселей исходного куба размером  $N_1 \cdot N_2 \cdot N_3$

**Обратное 3D ДКП.** Обратное 3D ДКП выполняется по следующей формуле:

$$x(n_1, n_2, n_3) = \sum_{k_1=0}^{N-1} \sum_{k_2=0}^{N-1} \sum_{k_3=0}^{N-1} \epsilon_{k1} \epsilon_{k2} \epsilon_{k3} X(k_1, k_2, k_3) \times \cos\left(\frac{\pi}{2N}(2n_1+1)k_1\right) \times \cos\left(\frac{\pi}{2N}(2n_2+1)k_2\right) \times \cos\left(\frac{\pi}{2N}(2n_3+1)k_3\right) \quad (2)$$

где  $n_1, n_2, n_3 = 0, 1, \dots, N-1$

$$\epsilon_{ki} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & \text{при } k_i = 0 \\ 1, & \text{в другом случае} \end{cases}, i = 1, 2, 3$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}(n_1, n_2, n_3) \\ \tilde{x}(n_1, n_2, N-n_3-1) \\ \tilde{x}(n_1, N-n_2-1, n_3) \\ \tilde{x}(n_1, N-n_2-1, N-n_3-1) \\ \tilde{x}(N-n_1-1, n_2, n_3) \\ \tilde{x}(N-n_1-1, n_2, N-n_3-1) \\ \tilde{x}(N-n_1-1, N-n_2-1, n_3) \\ \tilde{x}(N-n_1-1, N-n_2-1, N-n_3-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(2n_1, 2n_2, 2n_3) \\ x(2n_1, 2n_2, 2n_3+1) \\ x(2n_1, 2n_2+1, 2n_3) \\ x(2n_1, 2n_2+1, 2n_3+1) \\ x(2n_1+1, 2n_2, 2n_3) \\ x(2n_1+1, 2n_2, 2n_3+1) \\ x(2n_1+1, 2n_2+1, 2n_3) \\ x(2n_1+1, 2n_2+1, 2n_3+1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

где  $0 \leq n_1, n_2, n_3 \leq \frac{N}{2}-1$ . Заменяя  $x(n_1, n_2, n_3)$  в (1)

на  $\tilde{x}(n_1, n_2, n_3)$  в (3), можно записать  $X(k_1, k_2, k_3)$  как:

$$X(k_1, k_2, k_3) = \sum_{n_1=0}^{N-1} \sum_{n_2=0}^{N-1} \sum_{n_3=0}^{N-1} \tilde{x}(n_1, n_2, n_3) \times \cos(\varphi_1 k_1) \cos(\varphi_2 k_2) \cos(\varphi_3 k_3) \quad (4)$$

где  $\varphi_i = (\pi / 2N)(4n_i + 1), i = 1, 2, 3$ .

Если рассматривать четную и нечетную части  $k_1, k_2$  и  $k_3$ , то общую формулу для расчета 3D ДКП можно выразить в виде:

$$X(2k_1+i, 2k_2+j, 2k_3+l) = \sum_{n_1=0}^{N/2-1} \sum_{n_2=0}^{N/2-1} \sum_{n_3=0}^{N/2-1} \tilde{x}_{ijl}(n_1, n_2, n_3) \quad (5)$$

$\times \cos(\varphi_1(2k_1+i)) \cos(\varphi_2(2k_2+j)) \cos(\varphi_3(2k_3+l))$

$i, j, l = \{000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111\}$ , где

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{ijl}(n_1, n_2, n_3) &= \tilde{x}(n_1, n_2, n_3) + (-1)^i \tilde{x}(n_1, n_2, n_3 + \frac{n}{2}) + \\ &+ (-1)^j \tilde{x}(n_1, n_2 + \frac{n}{2}, n_3) + \\ &+ (-1)^{i+j} \tilde{x}(n_1, n_2 + \frac{n}{2}, n_3 + \frac{n}{2}) + (-1)^l \tilde{x}(n_1 + \frac{n}{2}, n_2, n_3) + \\ &+ (-1)^{i+l} \tilde{x}(n_1 + \frac{n}{2}, n_2, n_3 + \frac{n}{2}) + (-1)^{j+l} \tilde{x}(n_1 + \frac{n}{2}, n_2 + \frac{n}{2}, n_3) + \\ &+ (-1)^{i+j+l} \tilde{x}(n_1 + \frac{n}{2}, n_2 + \frac{n}{2}, n_3 + \frac{n}{2}) \end{aligned} \quad (6)$$

$i, j, l = 0$  или  $1$ .

Для  $k_1, k_2$  и  $k_3$  четных, (5) можно записать как:

$$X(2k_1, 2k_2, 2k_3) = \sum_{n_1=0}^{N/2-1} \sum_{n_2=0}^{N/2-1} \sum_{n_3=0}^{N/2-1} \tilde{x}_{000}(n_1, n_2, n_3) \times \cos(\varphi_1(2k_1)) \cos(\varphi_2(2k_2)) \cos(\varphi_3(2k_3)) \quad (7)$$

Для  $k_1, k_2$  четных и  $k_3$  нечетных, (5) можно записать как:

$$X(2k_1, 2k_2, 2k_3+1) = \sum_{n_1=0}^{N/2-1} \sum_{n_2=0}^{N/2-1} \sum_{n_3=0}^{N/2-1} \tilde{x}_{001}(n_1, n_2, n_3) \times \cos(\varphi_1(2k_1)) \cos(\varphi_2(2k_2)) \cos(\varphi_3(2k_3+1)) \quad (8)$$

Использование следующего тригонометрического тождества:

$$\cos(\varphi_i(2k_i+i)) = 2 \cos \varphi_i \cos \varphi_i(2k_i) - \cos(\varphi_i(2k_i-1)) \quad (9)$$

где  $i = 1, 2, 3$ .

$X(2k_1, 2k_2, 2k_3+1)$  можно разложить на  $(N/2) \times (N/2) \times (N/2)$ - 3-D ДКП и нескольких умножений и

сложений. Следовательно, можно разложить  $X(2k_1, 2k_2, 2k_3 + 1)$  как:

$$\begin{aligned} X(2k_1, 2k_2, 2k_3 + 1) &= \\ &= \left\{ \sum_{n_1=0}^{N/2-1} \sum_{n_2=0}^{N/2-1} \sum_{n_3=0}^{N/2-1} [2\tilde{x}_{001}(n_1, n_2, n_3) \times \cos \varphi_3] \right. \\ &\quad \left. \cos(\varphi_1 2k_1) \cos(\varphi_2 2k_2) \cos(\varphi_3 2k_3) \right\} - \\ &\quad - X(2k_1, 2k_2, 2k_3 - 1) \end{aligned} \quad (10)$$

Далее  $X(2k_1, 2k_2 + 1, 2k_3)$  можно разложить следующим образом:

$$\begin{aligned} X(2k_1, 2k_2 + 1, 2k_3) &= \\ &= \left\{ \sum_{n_1=0}^{N/2-1} \sum_{n_2=0}^{N/2-1} \sum_{n_3=0}^{N/2-1} [2\tilde{x}_{010}(n_1, n_2, n_3) \times \cos \varphi_2] \right. \\ &\quad \left. \cos(\varphi_1 2k_1) \cos(\varphi_2 2k_2) \cos(\varphi_3 2k_3) \right\} - \\ &\quad - X(2k_1, 2k_2 - 1, 2k_3) \end{aligned} \quad (11)$$

А значение  $X(2k_1, 2k_2, 2k_3 + 1)$  можно вычислить по формуле:

$$\begin{aligned} X(2k_1 + 1, 2k_2, 2k_3) &= \\ &= \left\{ \sum_{n_1=0}^{N/2-1} \sum_{n_2=0}^{N/2-1} \sum_{n_3=0}^{N/2-1} [2\tilde{x}_{011}(n_1, n_2, n_3) \times \cos \varphi_1] \right. \\ &\quad \left. \cos(\varphi_1 2k_1) \cos(\varphi_2 2k_2) \cos(\varphi_3 2k_3) \right\} - \\ &\quad - X(2k_1 - 1, 2k_2, 2k_3) \end{aligned} \quad (12)$$

Для четных  $k_1$  и нечетных  $k_2$  и  $k_3$  можно записать  $X(2k_1, 2k_2 + 1, 2k_3 + 1)$  следующим образом:

$$X(2k_1, 2k_2 + 1, 2k_3 + 1) = \sum_{n_1=0}^{N/2-1} \sum_{n_2=0}^{N/2-1} \sum_{n_3=0}^{N/2-1} 2\tilde{x}_{011}(n_1, n_2, n_3) \cdot \cos(\varphi_1 2k_1) \cos(\varphi_2 (2k_2 + 1)) \cos(\varphi_3 (2k_3 + 1)) \quad (13)$$

Использование тригонометрического тождества:

$$\begin{aligned} \cos(\varphi_i (2k_i + 1)) \cos(\varphi_j (2k_j + 1)) &= \\ &= 4 \cos \varphi_i \cos \varphi_j \cos(\varphi_i 2k_i) \cos(\varphi_j 2k_j) - \\ &\quad \cos(\varphi_i 2k_i - 1) \cos(\varphi_j 2k_j + 1) - \\ &\quad \cos(\varphi_i 2k_i + 1) \cos(\varphi_j 2k_j - 1) - \\ &\quad \cos(\varphi_i 2k_i - 1) \cos(\varphi_j 2k_j - 1) \end{aligned} \quad (14)$$

$X(2k_1, 2k_2 + 1, 2k_3 + 1)$  будет преобразован в  $(N/2) \times (N/2) \times (N/2)$ :

$$\begin{aligned} X(2k_1, 2k_2 + 1, 2k_3 + 1) &= \left\{ \sum_{n_1=0}^{N/2-1} \sum_{n_2=0}^{N/2-1} \sum_{n_3=0}^{N/2-1} [4\tilde{x}_{011}(n_1, n_2, n_3) \right. \\ &\quad \left. \times \cos \varphi_2 \cos \varphi_3] \cos(\varphi_1 2k_1) \cos(\varphi_2 2k_2) \cos(\varphi_3 2k_3) \right\} \\ &\quad - X(2k_1, 2k_2 - 1, 2k_3 + 1) - X(2k_1, 2k_2 + 1, 2k_3 - 1) \\ &\quad - X(2k_1, 2k_2 - 1, 2k_3 - 1) \end{aligned} \quad (15)$$

Аналогично  $X(2k_1, 2k_2 + 1, 2k_3 + 1)$  и

$X(2k_1, 2k_2 + 1, 2k_3 + 1)$  можно разложить следующим образом:

$$\begin{aligned} X(2k_1 + 1, 2k_2, 2k_3 + 1) &= \left\{ \sum_{n_1=0}^{N/2-1} \sum_{n_2=0}^{N/2-1} \sum_{n_3=0}^{N/2-1} [4\tilde{x}_{101}(n_1, n_2, n_3) \times \right. \\ &\quad \left. \times \cos \varphi_1 \cos \varphi_3] \cos(\varphi_1 2k_1) \cos(\varphi_2 2k_2) \cos(\varphi_3 2k_3) \right\} - \\ &\quad - X(2k_1 - 1, 2k_2, 2k_3 + 1) - X(2k_1 + 1, 2k_2, 2k_3 - 1) \\ &\quad - X(2k_1 - 1, 2k_2, 2k_3 - 1) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} X(2k_1 + 1, 2k_2 + 1, 2k_3) &= \\ &= \left\{ \sum_{n_1=0}^{N/2-1} \sum_{n_2=0}^{N/2-1} \sum_{n_3=0}^{N/2-1} [4\tilde{x}_{110}(n_1, n_2, n_3) \times \right. \\ &\quad \left. \times \cos \varphi_1 \cos \varphi_2] \cos(\varphi_1 2k_1) \cos(\varphi_2 2k_2) \cos(\varphi_3 2k_3) \right\} \\ &\quad - X(2k_1 - 1, 2k_2 + 1, 2k_3) - X(2k_1 + 1, 2k_2 - 1, 2k_3) - \\ &\quad - X(2k_1 - 1, 2k_2 - 1, 2k_3) \end{aligned} \quad (17)$$

Для  $k_1, k_2$  и  $k_3$  -нечетных,  $X(2k_1 + 1, 2k_2 + 1, 2k_3 + 1) \dots$

$X(2k_1 + 1, 2k_2 + 1, 2k_3 + 1)$  имеем:

$$\begin{aligned} X(2k_1 + 1, 2k_2 + 1, 2k_3 + 1) &= \\ &= \sum_{n_1=0}^{N/2-1} \sum_{n_2=0}^{N/2-1} \sum_{n_3=0}^{N/2-1} 2\tilde{x}_{111}(n_1, n_2, n_3) \cdot \\ &\quad \cdot \cos(\varphi_1 (2k_1 + 1)) \cos(\varphi_2 (2k_2 + 1)) \cos(\varphi_3 (2k_3 + 1)) \end{aligned} \quad (18)$$

Использование следующих тригонометрических тождеств:

$$\begin{aligned} \cos(\varphi_i (2k_i + 1)) \cos(\varphi_j (2k_j + 1)) \cos(\varphi_l (2k_l + 1)) &= \\ &= 8 \cos \varphi_i \cos \varphi_j \cos \varphi_l \cos \varphi_i (2k_i) \cos \varphi_j (2k_j) \cos \varphi_l (2k_l) \\ &\quad - \cos(\varphi_i (2k_i + 1)) \cos(\varphi_j (2k_j + 1)) \cos(\varphi_l (2k_l - 1)) - \\ &\quad - \cos(\varphi_i (2k_i + 1)) \cos(\varphi_j (2k_j - 1)) \cos(\varphi_l (2k_l + 1)) - \\ &\quad - \cos(\varphi_i (2k_i + 1)) \cos(\varphi_j (2k_j - 1)) \cos(\varphi_l (2k_l - 1)) - \\ &\quad - \cos(\varphi_i (2k_i - 1)) \cos(\varphi_j (2k_j + 1)) \cos(\varphi_l (2k_l + 1)) - \\ &\quad - \cos(\varphi_i (2k_i - 1)) \cos(\varphi_j (2k_j + 1)) \cos(\varphi_l (2k_l - 1)) - \\ &\quad - \cos(\varphi_i (2k_i - 1)) \cos(\varphi_j (2k_j - 1)) \cos(\varphi_l (2k_l + 1)) - \\ &\quad - \cos(\varphi_i (2k_i - 1)) \cos(\varphi_j (2k_j - 1)) \cos(\varphi_l (2k_l - 1)) \end{aligned} \quad (19)$$

$X(2k_1 + 1, 2k_2 + 1, 2k_3 + 1)$  может быть преобразован в  $(N/2) \times (N/2) \times (N/2) X(2k_1 + 1, 2k_2 + 1, 2k_3 + 1)$

$$\begin{aligned} X(2k_1 + 1, 2k_2 + 1, 2k_3 + 1) &= \left\{ \sum_{n_1=0}^{N/2-1} \sum_{n_2=0}^{N/2-1} \sum_{n_3=0}^{N/2-1} [8\tilde{x}_{111}(n_1, n_2, n_3) \right. \\ &\quad \left. \times \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \varphi_3] \times \right. \\ &\quad \left. \times \cos(\varphi_1 2k_1) \cos(\varphi_2 2k_2) \cos(\varphi_3 2k_3) \right\} - \\ &\quad - X(2k_1 + 1, 2k_2 + 1, 2k_3 - 1) - X(2k_1 + 1, 2k_2 - 1, 2k_3 + 1) \\ &\quad - X(2k_1 + 1, 2k_2 - 1, 2k_3 - 1) - X(2k_1 - 1, 2k_2 + 1, 2k_3 + 1) \\ &\quad - X(2k_1 - 1, 2k_2 + 1, 2k_3 - 1) - X(2k_1 - 1, 2k_2 - 1, 2k_3 + 1) \\ &\quad - X(2k_1 - 1, 2k_2 - 1, 2k_3 - 1) \end{aligned} \quad (20)$$

## 2. Арифметическая сложность алгоритма 3-D ДКП

Расчет 3-D ДКП-II с использованием предложенного быстрого алгоритма состоит из четырех этапов, как показано на рис. 2.



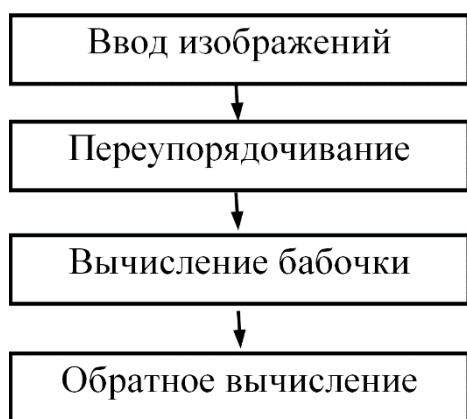


Рис. 2. Этапы алгоритма ДКП

**Первый этап** – Ввод видеоданных наблюдения.  
**Второй этап** – это 3-D переупорядочение с использованием индексного отображения, иллюстрируемого формулой (3).  
**Третий этап** – это расчет бабочки. Каждая бабочка вычисляет восемь точек вместе с использованием формул (7), (10)–(12), (15), (16), и (20), и показано на рис. 3.

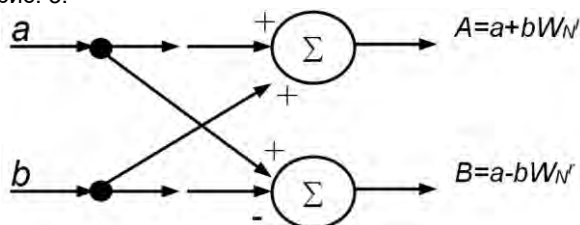


Рис. 3. Схема бабочки для вычисления ДКП

Весь расчет 3ДДКП требует  $\log_2 N$  этапов, и каждый этап включает в себя  $(N^3/8)$  бабочки. Весь 3-D ДКП требует  $(N^3/8) \log_2 N$ , чтобы бабочки были завершены.

**Четвертый этап** – это обратный расчет бабочки.

Каждая бабочка требует семи действительных операций умножения и 24 действительных сложения.

Таким образом, общее количество действительных умножений необходимых для этого этапа равно  $7/8 N^3 \log_2 N$ , и общее количество действительных сложений  $24/8 N^3 \log_2 N$ .

Общее количество реальных сложений равно  $(3/2) N^3 \log_2 N^3 - 3N^3 + 3N^2$ .

Следовательно, общее число действительных умножений и сложений, необходимых для вычисления 3-D ДКП-II с использованием быстрого алгоритма равно:

$$\text{Число умножителей} = \frac{7}{8} N^3 \log_2 N \quad (21)$$

Число сложений равно:

$$\left[ \frac{24}{8} N^3 \log_2 N \right] + \left[ \frac{3}{2} N^3 \log_2 N - 3N^3 + 3N^2 \right] = \frac{9}{2} N^3 \log_2 N - 3N^3 + 3N^2 \quad (22)$$

Общее количество арифметических операций (включая тривиальные операции) для 3-D ДКП-II BP DIF алгоритма приведено в таблице I для различных размеров преобразования.

Сравнение 3-D ДКП-II BP алгоритма с другими связанными алгоритмами

В этом разделе сравниваются расчеты 3-D ДКП-II с использованием алгоритма 3-D BP и подхода ПСА на основе арифметических операций и времени работы компьютера. Разработанный алгоритм также косвенно сравнивается с существующими быстрыми 3-D алгоритмами для 3-D Dcs.

Б) Сравнение сложности алгоритмов 3D-ДКП BP и ПСА

Арифметическая сложность алгоритма 3-D BP для 3-D ДКП-II была получена в разделе III-B. С другой стороны, 3-D ДКП-II можно вычислить с использованием подхода ПСА, основанного на 1-D алгоритмах. Поскольку алгоритм 3-D BP основан на идее radix-2 в 1D, 3D BP сравнивается с подходом 3-D ПСА, основанным на алгоритме 1-D radix-2 [32]. Этот алгоритм был использован в качестве основы для целей сравнения, и он включает в себя:

$$\text{Число умножителей} = \left[ \frac{1}{2} \text{Mog}_2 N \right],$$

$$\text{И число сложений} = \left[ \frac{3}{2} \text{Mog}_2 N - N + 1 \right].$$

1-D алгоритм должен применяться последовательно по строкам, столбцам и кадрам, тогда:

Число умножителей =

$$N^2 \left[ \frac{1}{2} \text{Mog}_2 N \right] + N^2 \left[ \frac{1}{2} \text{Mog}_2 N \right] + N^2 \left[ \frac{1}{2} \text{Mog}_2 N \right] = \left[ \frac{3}{2} N^3 \log_2 N \right] \quad (23)$$

Число сложений =

$$N^2 \left[ \frac{3}{2} \text{Mog}_2 N - N + 1 \right] + N^2 \left[ \frac{3}{2} \text{Mog}_2 N - N + 1 \right] + N^2 \left[ \frac{3}{2} \text{Mog}_2 N - N + 1 \right] = N^2 \left[ \frac{9}{2} N^3 \log_2 N - N + 1 \right] \quad (24)$$

Арифметические операции подробно описаны в таблице 1 для различных размеров преобразования.

Таблица 1.

**Количество операций умножений и сложений предложенного ДКП**

Размер куба для преобразования	Умн./пиксель		Слож./пиксель		Умн.+Слож./пиксель	
	ЗДВР	ПСА	ЗД ВР	ПСА	ЗД ВР	ПСА
8×8×8	2.62	4.5	10.87	10.87	13.5	15.37
16×16×16	3.5	6	15.18	15.18	18.68	21.18
32×32×32	4.37	7.5	19.60	19.59	23.96	27.09
64×64×64	5.25	9	24.05	24.04	29.29	33.04
128×128×128	6.12	10.5	28.52	28.52	34.64	39.02
256×256×256	7	12	33.01	33.01	40.01	45.01
512×512×512	7.87	13.5	38.51	37.50	45.38	51.02
$2^{10} \times 2^{10} \times 2^{10}$	8.75	15	42.0	42.00	50.75	57.0
$2^{11} \times 2^{11} \times 2^{11}$	9.62	16.5	46.50	46.50	56.12	63.0
$2^{12} \times 2^{12} \times 2^{12}$	10.5	18	51.0	51.00	61.50	69.0

Из таблицы и рис. 3, можно видеть, что общее число умножений, связанных с алгоритмом 3-D ДКП BP, меньше, чем у подхода ПСА, более чем на 40%. Кроме того, подход ПСА включает в себя транспонирование матрицы и большую индексацию и обмен данными, чем новый алгоритм. Это делает 3-D ДКП BP алгоритм более эффективным и лучше подходит для 3-D приложений, которые включают в

себя 3-D ДКП, таких как сжатие видео и других 3-D приложений обработки изображений [30–36].

### Заключение

В настоящей работе для быстрого вычисления 3D-ДКП был реализован математический аппарат, основанный на применении вектора – радика (Radix), известного, как алгоритм Кули-Тьюки быстрого преобразования Фурье, который делит размеры преобразования на более короткие с целью уменьшения числа арифметических операции умножения и сложения.

Передача изображений в системах наблюдения является чрезвычайно важной частью современных интеллектуальных транспортных видеосистем наблюдения. Имея возможность сжимать изображения до доли их исходного размера, можно сэкономить ценное и дорогое дисковое пространство памяти. Кроме того, передача изображений с мест чрезвычайных ситуаций и аварий в диспетчерский центр управления в реальном времени становится возможным.

Из вышеприведенного исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. предлагаемый быстрый алгоритм на основе вектора – радика позволяет сокращать число умножений в 3-4 раза, а числа сложений в 2-3 раза по сравнению с классическими вариантами, применяемые в стандартах сжатия MPEGx;

2. поскольку метод классического косинусного преобразования является более простым в реализации, то переход к адаптивному варианту потребует увеличения сложности на 20-30 %, а при реализации с использованием программируемых схем увеличение сложности не превышает 10 % от общей сложности;

3. получены статистические характеристики и зависимости количества блоков, подвергающихся косинусному преобразованию, различного размера от степени однородности областей изображений, позволяющие уменьшить вычислительную сложность устройств передачи видеoinформации в 2-3 раза.

Внедрение предложенного метода допустимо в элементах подсистем видеонаблюдения, входящих в состав интеллектуальной транспортной системы [33-39], систем видеонаблюдения судопропуска [40-41], с учетом совершенствования смежных аспектов [42-44], а также в видеосистемах безопасности современных энергетических комплексов [45, 46].

В заключение следует отметить важное направление развития видеосистем на кристалле и научные исследования, проводимые в АО «НИИ Телевидение» г. Санкт-Петербурга при аппаратной реализации кодека на основе трехмерного косинусного преобразования с использованием схем с программируемой логикой и программной реализации на языке высокого уровня.

### Литература

1. N. Ahmed, T. Natarajan, and K. R. Rao, "Discrete cosine transform," IEEE Trans. Comput., vol. C-23, pp. 90–93, Jan. 1974.
2. R. J. Clark, "Relation between the Karhunen-Loeve and cosine transform," Proc. IEEE, vol. 128, pp. 359–360, Nov. 1981.
3. K. R. Rao and P. Yip, Discrete Cosine Transform: Algorithms, Advantages, Applications. New York: Academic, Sept. 1990.
4. K. Sayood, Introduction to Data Compression. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 1996.
5. S. Lee, Y. Kim, and S. W. Choi, "Fast scene change detection using direct feature extraction from MPEG compressed videos," IEEE Trans. Multimedia, vol. 2, pp. 240–254, Dec. 2000.
6. S. Rhee and M. G. Kang, "ДКП-based regularized algorithm for highresolution image reconstruction," in Proc. Int. Conf. Image Processing, vol. 3, 1999, pp. 184–187.
7. J. Yang, Y. Suematsu, and S. Shimizu, "Recognition of traffic marks in the images of WAHD lens by using color information and neural networks," in Proc. IECOM, vol. 3, 1998, pp. 1351–1356.
8. P. Duhamel and C. Guillemot, "Polynomial transform computation of the 2-D ДКП," in Proc. Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process., Apr. 1990, pp. 1515–1518.
9. E. Feig and S. Winograd, "Fast algorithms for the discrete cosine transform," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 40, pp. 2174–2193, Sept. 1992.
10. E. Feig and E. Linzer, "Scaled ДКПs on input sizes that are composite," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 43, pp. 43–50, Jan. 1995.
11. B. G. Lee, "A new algorithm to compute discrete cosine transform," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. ASSP-32, pp. 1243–1245, Dec. 1984.
12. J. Takala, D. Akopian, J. Astola, and J. Saarinen, "Constant geometry algorithm for discrete cosine transform," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 48, pp. 1840–1843, June 2000.
13. Березин В.В., Фахми Ш.С., Цыцулин А.К. Начальный этап проектирования видеосистем на кристалле// Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 11. С. 76-83.
14. Фахми Ш.С. Полигональная рекурсивная обработка видеoinформации// Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2008. № 1. С. 42-51.
15. Фахми Ш.С. Систематизация алгоритмов нахождения и кодирования опорных точек изображений// Фахми Ш.С., Еид М.М., Бобровский А.И. и др./ Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2017. № 3. С. 15-20.
16. 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.
17. Фахми Ш.С. Способ кодирования и декодирования видеoinформации на основе трехмерного дискретного косинусного преобразования// Умбиталиев А.А., Цыцулин А.К., Шипилов Н.Н., Ибатуллин С.М., Ибатуллин В.Ф., Фахми Ш.С. патент на изобретение RUS 2375838 19.11.2008

18. Цыцулин А.К., Фахми Ш.С., Колесников Е.И., Очкур С.В. Функционал взаимодействия сложности и точности систем кодирования непрерывного сигнала// Информационные технологии. 2011. № 4. С. 71-77.
19. Зубакин И.А., Фахми Ш.С., Цыцулин А.К. Решения уравнения связи/ Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2008. № 2. С. 9-27.
20. 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.
21. Фахми Ш.С. Выделение и хранение опорных точек изображений на основе динамических рекурсивных структур// Бобровский А.И., Еид М.М., Костикова Е.В., Салем А., Алмахрук М.М., Фахми Ш.С./ Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2016. № 3. С. 99-107.
22. 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.
23. Шагаров С.С., Зубакин И.А., Фахми Ш.С. Адаптивные алгоритмы кодирования видеoinформации/ Приборы. 2010. № 4 (118). С. 28-31.
24. 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.
25. Фахми Ш.С. Пирамидально-рекурсивный метод кодирования и декодирования видеoinформации// Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2007. № 2. С. 43-51.
26. Манцетов А.А., Зубакин И.А., Козлов В.В., Фахми Ш.С., Цыцулин А.К. Адаптация космической телевизионной системы к этапам наблюдения объектов// Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2012. № 1. С. 29-43.
27. Цыцулин А.К., Фахми Ш.С. Видеосистемы на кристалле: новые архитектурные решения в задачах обработки видеoinформации// Датчики и системы. 2011. № 4. С. 58-61.
28. H. R. Wu and F. J. Paoloni, "The structure of vector radix fast Fourier transforms," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. 37, pp. 1415-1424, Sept. 1989.
29. S. Boussakta, O. Alshibami, and M. Aziz, "Radix-2\_2\_2 algorithm for the 3-D discrete Hartley transform," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 49, pp. 3145-3156, Dec. 2001.
30. J. Markoul, "A fast cosine transform in one and two dimensions," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. ASSP-28, pp. 27-34, Feb. 1980.
31. O. Alshibami and S. Boussakta, "Three-dimensional algorithm for the 3-D ДКП-III," in Proc. Sixth Int. Symp. Commun., Theory Applications, July 2001, pp. 104-107.
32. S. C. Chan and K. L. Ho, "Direct methods for computing discrete sinusoidal transforms," in Proc. Inst. Elect. Eng. Radar Signal Process., vol. 137, Dec. 1990, pp. 433-442.
33. Ya.Seliverstov, I. Malygin, S. Seliverstov, M. Silnikov, R. Muksimova, G. Gergel, V. Chigur, Sh. Fahmi. Mobile Technologies in Intelligent Transportation Systems. Convergent 2018, CCIS 1140, pp. 1-8, 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37436-5\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37436-5_33)
34. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А., Титов В.О., Выдрина Е.О., Гуляевский С.Е., Ващук А.Э. Разработка структурной схемы морской интеллектуальной транспортной системы арктического региона. Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 1-1 (47). С. 84-98.
35. Seliverstov S.A., Seliverstov Y.A., Tarantsev A.A., Grigoriev V.A., Elyashevich A.M., Muksimova R.R. Elaboration of intelligent development system of megalopolis transportation. In: Proceedings of 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS), CTS 2017. 2017. p.211-215.
36. 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.
37. 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. 126-130.
38. Seliverstov Ya.A., Seliverstov Sv.A., Komashinskiy V.I., Tarantsev A. A., Shatalova N.V., Grigoriev V.A. Intelligent systems preventing road traffic accidents in megalopolises in order to evaluate. In: Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017. p.489-492.
39. Seliverstov Y.A., Malygin I.G., Komashinskiy V.I., Tarantsev A.A., Shatalova N.V., Petrova V.A. The St. Petersburg transport system simulation before opening new subway stations. In: Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017. p. 284-287.
40. Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А., Лукомская О.Ю., Асаул М.А. Разработка имитационной модели управления прохождением судов через систему судопропуска Волго-Донского судоходного. Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 3-3 (37). С. 105-114.
41. Лукомская О.Ю., Селиверстов С.А., Селиверстов Я.А., Шаталова Н.В. О разработке и тестировании алгоритма планирования расписания движения судов через систему Волго-Балтийского судоходного канала. Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 3-4 (38). С. 115-126.
42. Ya. Seliverstov, D. Skorokhodov, S. Seliverstov, I. Burov, E. Vydrina, N. Podoprigo6, N. Shatalova, V. Chigur, A. Cheremisina. Using Augmented Reality Convergent Cognitive Information Technologies. Convergent 2018, CCIS 1140, pp. 1-10, 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37436-5\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37436-5_30)
43. Фахми Ш.С., Шаталова Н.В., Селиверстов С.А., Хасан Я.А., Абдулджаббар Н.Т.М., Иванов А.В. Гибридный метод преобразования изображений морских судов. Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 3-3 (45). С. 121-131.

44. 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.
45. Abramovich, B & Bogdanov, I & Kopteva, Alexandra & Malarev, Vadim. (2019). The system of trigeneration with binary cycle for use as an energy source for gas fuel. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 643. 012092. 10.1088/1757-899X/643/1/012092. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/643/1/012092/pdf>
46. Богданов И.А., Веприков А.А., Касьянова А.Н., Моренов В.А. Повышение энергоэффективности электротехнических комплексов когенерационных установок для электроснабжения объектов нефтегазовых предприятий / Международный научно-исследовательский журнал. Номер: 12-5 (66) Год: 2017. Стр. 59-63.

#### References

1. N. Ahmed, T. Natarajan, and K. R. Rao, "Discrete cosine transform," IEEE Trans. Comput., vol. C-23, pp. 90–93, Jan. 1974.
2. R. J. Clark, "Relation between the Karhunen-Loeve and cosine transform," Proc. IEEE, vol. 128, pp. 359–360, Nov. 1981.
3. K. R. Rao and P. Yip, Discrete Cosine Transform: Algorithms, Advantages, Applications. New York: Academic, Sept. 1990.
4. K. Sayood, Introduction to Data Compression. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 1996.
5. S. Lee, Y. Kim, and S. W. Choi, "Fast scene change detection using direct feature extraction from MPEG compressed videos," IEEE Trans. Multimedia, vol. 2, pp. 240–254, Dec. 2000.
6. S. Rhee and M. G. Kang, "DKP-based regularized algorithm for highresolution image reconstruction," in Proc. Int. Conf. Image Processing, vol. 3, 1999, pp. 184–187.
7. J. Yang, Y. Suematsu, and S. Shimizu, "Recognition of traffic marks in the images of WAHD lens by using color information and neural networks," in Proc. IECON, vol. 3, 1998, pp. 1351–1356.
8. P. Duhamel and C. Guillemot, "Polynomial transform computation of the 2-D DKP," in Proc. Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process., Apr. 1990, pp. 1515–1518.
9. E. Feig and S. Winograd, "Fast algorithms for the discrete cosine transform," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 40, pp. 2174–2193, Sept. 1992.
10. E. Feig and E. Linzer, "Scaled DKPs on input sizes that are composite," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 43, pp. 43–50, Jan. 1995.
11. B. G. Lee, "A new algorithm to compute discrete cosine transform," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. ASSP-32, pp. 1243–1245, Dec. 1984.
12. J. Takala, D. Akopian, J. Astola, and J. Saarinen, "Constant geometry algorithm for discrete cosine transform," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 48, pp. 1840–1843, June 2000.
13. Berezin V.V., Fahmi SH.S., Cyculin A.K. Nachal'nyj etap proektirovaniya videosistem na kristalle [Initial design stage of video systems on a chip] // Opticheskij zhurnal. 2012. T. 79. № 11. S. 76-83.
14. Fahmi SH.S. Poligonal'naya rekursivnaya obrabotka videoinformacii [Polygonal recursive processing of video information] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2008. № 1. S. 42-51.
15. Fahmi SH.S. Sistemizatsiya algoritmov nahozhdeniya i kodirovaniya opornykh toчек izobrazhenij [Systematization of algorithms for finding and encoding image control points] // Fahmi SH.S., Eid M.M., Bobrovskij A.I. i dr. / Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2017. № 3. S. 15-20.
16. Fahmi SH.S. Tochnost', skorost' i slozhnost' ustrojstv kodirovaniya izobrazhenij po opornym tochkam [Precision, speed and complexity of devices for image coding by control points] // Al'mahruk M.M., Bobrovskij A.I., Eid M.M., Sokolov YU.M., Salem A., Fahmi SH.S. / Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki. 2016. T. 16. № 4. S. 678-688.
17. Fahmi SH.S. Sposob kodirovaniya i dekodirovaniya videoinformacii na osnove trekhmernogo diskretnogo kosinusnogo preobrazovaniya [Method of coding and decoding video information based on three-dimensional discrete cosine transformation] // Umbitaliev A.A., Cyculin A.K., SHipilov N.N., Ibatullin S.M., Ibatulin V.F., Fahmi SH.S. patent na izobrenenie RUS 2375838 19.11.2008
18. Cyculin A.K., Fahmi SH.S., Kolesnikov E.I., Ochkur S.V. Funkcional vzaimoobmena slozhnosti i tochnosti sistem kodirovaniya nepreryvnogo signala [Functional Interchange of Transmission Rate and Complexity of the Coder Continuous Signal] // Informacionnye tekhnologii. 2011. № 4. S. 71-77.
19. Zubakin I.A., Fahmi SH.S., Cyculin A.K. Resheniya uravneniya svyazi [Solutions of the equation of communication] / Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2008. № 2. S. 9-27.
20. Cyculin A.K., Fahmi SH.S., Zubakin I.A. Nachal'nyj etap proektirovaniya kodera istochnika nepreryvnogo signala [Continuous signal encoder design. Initial stage] / Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2010. № 2. S. 17-34.
21. Fahmi SH.S. Vydelenie i hranenie opornykh toчек izobrazhenij na osnove dinamicheskikh rekursivnykh struktur [Isolation and storage of image control points based on dynamic recursive structures] // Bobrovskij A.I., Eid M.M., Kostikova E.V., Salem A., Almahruk M.M., Fahmi SH.S. / Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2016. № 3. S. 99-107.
22. SHatalova N.V., Fahmi SH.S., Mukalo YU.I., Gavrillov I.A. Obnaruzhenie i raspoznavanie transportnykh sredstv [Vehicle Detection and Recognition] / V sbornike: Transport rossii: problemy i perspektivy - 2016 Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2016. S. 187-193.
23. SHagarov S.S., Zubakin I.A., Fahmi SH.S. Adaptivnye algoritmy kodirovaniya videoinformacii [Adaptive video coding algorithms] / Pribory. 2010. № 4 (118). S. 28-31.



24. Bobrovskij A.I., Eid M.M., Almahruk M.M., Salem A., Fahmi SH.S. Informacionnye pokazateli kachestva ustrojstv kodirovaniya izobrazhenij po opornym tochkam [Information quality metrics of devices encode images with control points] // *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*. 2016. № 3. S. 86-91.
25. Fahmi SH.S. Piramidal'no-rekursivnyj metod kodirovaniya i dekodirovaniya videoinformacii [Pyramid-recursive method for encoding and decoding video information] // *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*. 2007. № 2. S. 43-51.
26. Mancvetov A.A., Zubakin I.A., Kozlov V.V., Fahmi SH.S., Cyculin A.K. Adaptaciya kosmicheskoy televizionnoj sistemy k etapam nablyudeniya ob"ektov [Adaptation of space television system to supervision stages of objects] // *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*. 2012. № 1. S. 29-43.
27. Cyculin A.K., Fahmi SH.S. Videosistemy na kristalle: novye arhitekturnye resheniya v zadachah obrabotki videoinformacii [Videosystems on CHIP: new architectural decisions of videoinformation processing] // *Datchiki i sistemy*. 2011. № 4. S. 58-61.
28. H. R. Wu and F. J. Paoloni, "The structure of vector radix fast Fourier transforms," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. 37, pp. 1415–1424, Sept. 1989.
29. S. Boussakta, O. Alshibami, and M. Aziz, "Radix-2\_2\_2 algorithm for the 3-D discrete Hartley transform," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 49, pp. 3145–3156, Dec. 2001.
30. J. Markoul, "A fast cosine transform in one and two dimensions," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-28, pp. 27–34, Feb. 1980.
31. O. Alshibami and S. Boussakta, "Three-dimensional algorithm for the 3-D DKP-III," in *Proc. Sixth Int. Symp. Commun., Theory Applications*, July 2001, pp. 104–107.
32. S. C. Chan and K. L. Ho, "Direct methods for computing discrete sinusoidal transforms," in *Proc. Inst. Elect. Eng. Radar Signal Process.*, vol. 137, Dec. 1990, pp. 433–442.
33. Ya. Seliverstov, I. Malygin, S. Seliverstov, M. Silnikov, R. Muksimova, G. Gergel, V. Chigur, Sh. Fahmi. *Mobile Technologies in Intelligent Transportation Systems. Convergent 2018, CCIS 1140*, pp. 1–8, 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37436-5\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37436-5_33)
34. Seliverstov S.A., Seliverstov YA.A., Titov V.O., Vydrina E.O., Gulyaevskij S.E., Vashchuk A.E. *Razrabotka strukturnoj skhemy morskoy intellektual'noj transportnoj sistemy arkticheskogo regiona*. [Development of the structural scheme of the marine intelligent transport system of the arctic region]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2020. № 1-1 (47). S. 84-98.
35. Seliverstov S.A., Seliverstov Y.A., Tarantsev A.A., Grigoriev V.A., Elyashevich A.M., Muksimova R.R. *Elaboration of intelligent development system of megalopolis transportation*. In: *Proceedings of 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS), CTS 2017*. 2017. p.211-215.
36. 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.
37. 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. 126-130.
38. Seliverstov Ya.A., Seliverstov Sv.A., Komashinskiy V.I., Tarantsev A. A., Shatalova N.V., Grigoriev V.A. *Intelligent systems preventing road traffic accidents in megalopolises in order to evaluate*. In: *Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017*. p.489-492.
39. Seliverstov Y.A., Malygin I.G., Komashinskiy V.I., Tarantsev A.A., Shatalova N.V., Petrova V.A. *The St. Petersburg transport system simulation before opening new subway stations*. In: *Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017*. p. 284-287.
40. Seliverstov S.A., Seliverstov YA.A., Lukomskaya O.YU., Asaul M.A. *Razrabotka imitacionnoj modeli upravleniya prohozhdeniem sudov cherez sistemu sudopropuska Volgo-Donskogo sudohodnogo*. [Development of the simulation of management of the lock control system Volga-Don channel]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2017. № 3-3 (37). S. 105-114.
41. Lukomskaya O.YU., Seliverstov S.A., Seliverstov YA.A., SHatalova N.V. *O razrabotke i testirovanii algoritma planirovaniya raspisaniya dvizheniya sudov cherez sistemu Volgo-Baltijskogo sudohodnogo kanala*. [ABOUT Development and testing of the schedule planning algorithm on the vessel traffic via the system of the Volgo-Baltic shipping channel]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2017. № 3-4 (38). S. 115-126.
42. Ya. Seliverstov, D. Skorokhodov, S. Seliverstov, I. Burov, E. Vydrina, N. Podoprighora6, N. Shatalova, V. Chigur, A. Cheremisina. *Using Augmented Reality Convergent Cognitive Information Technologies*. *Convergent 2018, CCIS 1140*, pp. 1–10, 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37436-5\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37436-5_30)
43. Fahmi SH.S., SHatalova N.V., Seliverstov S.A., Hasan YA.A., Abduldzhabbar N.T.M., Ivanov A.V. *Gibridnyj metod preobrazovaniya izobrazhenij morskikh sudov*. [Hybrid conversion method of marine images]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2019. № 3-3 (45). S. 121-131.
44. Fahmi SH.S., Kostikova E.V., Kryukova M.S., Seliverstov S.A. *Videosistema obnaruzheniya morskikh sudov po triangulyacionnym reshuyotkam*. [Video system of detecting marine ships on triangulation grids]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2018. № 1-3 (41). S. 143-155.
45. Abramovich, B & Bogdanov, I & Kopteva, Alexandra & Malarev, Vadim. (2019). *The system of trigeneration with binary cycle for use as an energy source for gas fuel*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 643. 012092. 10.1088/1757-899X/643/1/012092. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/643/1/012092/pdf>
46. Bogdanov I.A., Veprikov A.A., Kas'yanova A.N., Morenov V.A. *Povyshenie energoeffektivnosti elektrotekhnicheskikh kompleksov kogeneracionnyh ustanovok dlya elektrosnabzheniya ob"ektov neftegazovyh predpriyatij* [Improving

the energy efficiency of electrical complexes of cogeneration plants for power supply of oil and gas facilities] / MezhDunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. Nomer: 12-5 (66) God: 2017. Str. 59-63.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Елена Валентиновна Костикова**, кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования и прикладной информатики, Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7. Тел.: +(812) 748-96-45, м.т. 768, e-mail: [kostikova.ev@mail.ru](mailto:kostikova.ev@mail.ru)

**Шакиб Субхиевич Фахми**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус 1, помещение 11-53. Тел. +7(812) 234-36-75. Ведущий научный сотрудник Института 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 высшей математики и системного моделирования сложных процессов. Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС РФ. 196105, Санкт-Петербург, Московский проспект 149 Тел.: +7 (812) 369-44-49. e-mail: [shakeebf@mail.ru](mailto:shakeebf@mail.ru)

**Язид Абдуллахмид Абдулла Хасан**, аспирант кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус 1, помещение 11-53. Тел.: +7(812) 234-36-75. e-mail: [midocom@mail.ru](mailto:midocom@mail.ru)

**Святослав Александрович Селиверстов**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13 Кафедра компьютерных систем и программных технологий, Институт компьютерных наук и технологий Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21, e-mail: [seliverstov\\_s\\_a@mail.ru](mailto:seliverstov_s_a@mail.ru)

**Соболев Артём Валерьевич**, аспирант кафедры электроэнергетики и электромеханики, Горный университет 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, дом 2 Тел.: +7(981)836-00-00, e-mail: [sobolev\\_archi2010@mail.ru](mailto:sobolev_archi2010@mail.ru)

**Николай Владимирович Подопригора**, кандидат технических наук, доцент кафедры наземных транспортно-технологических машин, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4. Тел.: +7(812) 575-05-34, e-mail: [n.v.podoprighora@gmail.com](mailto:n.v.podoprighora@gmail.com)

**Elena V. Kostikova**, senior lecturer, Ph.D. (Eng), of the Department of mathematical modeling and applied Informatics, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya str, St.Petersburg, 198035. Russian Federation. Tel. +7(812) 748-96-45, i.p. 768, e-mail: [kostikova.ev@mail.ru](mailto:kostikova.ev@mail.ru)

**Shakeeb S. Fahmi**, Dr.Sci. (Eng), Professor of the Department of computer-aided design, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", room 11-53, building 1, 5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197376, Russian Federation. Tel. +7(812) 234-36-75. Leading researcher at the Institute of transport problems. N. S. Solomenko of the Russian Academy of Sciences, 13, line 12 Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. Tel. +7(812) 321-95-68 Professor of the Department of higher mathematics and system modeling of complex processes. Saint-Petersburg university of State fire service Emercom of Russia. 149 Moskovskiy prospect, Saint-Petersburg, 196105, Russian Federation. Tel. +7 (812) 369-44-49. e-mail: [shakeebf@mail.ru](mailto:shakeebf@mail.ru)

**Yazeed A.A. Hasan**, post-graduate student of Department of computer-aided design, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", room 11-53, building 1, 5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197376, Russian Federation. Tel. +7(812) 234-36-75. e-mail: [midocom@mail.ru](mailto:midocom@mail.ru)

**Svyatoslav A. Seliverstov**, Ph.D. (Eng), Senior researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, V.O. 12 line, 13, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. Department of Computer Systems & Software Engineering Institute of Computer Science and Technology Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 21, Polytechnicheskaya, St. Petersburg, 195251, Russian Federation, e-mail: [seliverstov\\_s\\_a@mail.ru](mailto:seliverstov_s_a@mail.ru)

**Artem V. Sobolev**, post-graduate student, Department of Electricity and electromechanical, Mining university, 2 21-liniya, St. Petersburg, 199106, Tel.: +7(981) 836-00-00, e-mail: [sobolev\\_archi2010@mail.ru](mailto:sobolev_archi2010@mail.ru)

**Nickolay V. Podoprighora**, Ph.D. (Eng), Senior lecturer, Department of Land Transport and Technological Machines, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 4 Vtoraja Krasnoarmejskaia, St.Petersburg, 190005, Russia, Tel.: +7(812) 575-05-34, e-mail: [n.v.podoprighora@gmail.com](mailto:n.v.podoprighora@gmail.com)

УДК 004.27;004.315; 621.382.2.3  
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.012

## Модифицированный маршрут проектирования транспортных видеосистем на кристалле

Ш.С. Фахми<sup>1,2,3</sup>, О.А. Королев<sup>1</sup>, Ю.Е. Крылов<sup>1</sup>, Е.В. Костикова<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, <sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), <sup>3</sup>Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, <sup>4</sup>Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова,

**Аннотация.** В эпоху интеллектуальных транспортных систем (ИТС) и технологий, поддерживающих механизмы анализа и передачи видеоинформации, проблема проектирования на основе технологии «система на кристалле» с распределением площади кристалла между вычислительной и фотоприёмной частями проекта становится важнейшей с позиции системного уровня проектирования. Проблема анализа видеоинформации в целом, кодирования и декодирования изображений с целью своевременной доставки в частности, до сих пор считается сложной и актуальной при синтезе видеосистем на кристалле. В работе предлагается модифицированный маршрут проектирования транспортных видеосистем на кристалле на основе функционала вектора концепции, включающего информационные показатели эффективности видеосистем анализа и передачи видеоинформации. Предложен модифицированный маршрут проектирования интеллектуальных транспортных видеосистем на основе технологии «система на кристалле».

**Ключевые слова:** маршрут проектирования, вектор концепции системы, системный уровень, вентилятор, программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), система на кристалле.

## Modified route design for transport video systems on chip

Shakeeb S. Fahmi<sup>1,2,3</sup>, Oleg A. Korolev<sup>1</sup>, Yuriy E. Krylov<sup>1</sup>, Elena V. Kostikova<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of science, <sup>2</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», <sup>3</sup>Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, <sup>4</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,

**Abstract.** In the era of intelligent transport video systems (ITVS) and technologies that support mechanisms for analyzing and transmitting video information, the problem of designing on the basis of technology "system on chip" and the allocation of chip area between computing and photodetector parts of the project becomes important with the system design level. The problem of analyzing video information in General, and encoding and decoding images for timely delivery in particular, is still considered complex and relevant in the synthesis of video systems on a chip. The paper proposes a modified route for designing transport video systems on a chip based on the functional vector of the concept, which includes information performance indicators of video systems for analysis and transmission of video information. A modified route for designing intelligent transport video systems based on the "system n crystal" technology is proposed.

**Keywords:** Design route, system concept vector, system level, gate, field-programmable gate array (FPGA), systems on chip.

### Введение

Экспоненциальный прогресс в области искусственного интеллекта (ИИ), машинного обучения, робототехники и автоматизации быстро трансформирует отрасли промышленности и общества по всему миру. Интенсивность научных исследований, инфраструктурных преобразований, развитие мультидисциплинарных направлений исследований происходит с революционными темпами и в грандиозных масштабах. Ожидается, что новая промышленная революция не только обеспечит прогресс и повышение жизненного уровня общества, но и повлечет за собой серьезные изменения в образе жизни и общественных нормах [1].

Важнейшим за последнее десятилетие становится развитие программных и аппаратных средств интеллектуализации жизнедеятельности человека, в частности внедрение методов и технологий распознавания образов на основе современной элементной базы вычислительной техники – системы на кристалле (СНК) [2,3].

Эффективное обнаружение и надежное сопоставление визуальных признаков является фундаментальной проблемой в компьютерных приложениях визуализации, таких как распознавание объектов, структуризация и индексация изображений, и визуальная локализация [4,5].

Аппаратная реализация и обеспечение требуемой точности поставленных задач проектирования в реальном времени является критическим требованием для большинства из этих приложений, которые требуют оперативного обнаружения и сопоставления визуальных функций в реальном времени. Несмотря на то, что методы обнаружения и сопоставления признаков достигли больших успехов в программной реализации, их узким местом до сих пор является аппаратная реализация на кристалле с учетом показателей точности и сложности СНК [6,7].

В настоящее время сложились следующие методологии реализации элементов и устройств цифровой обработки видеоинформации [8,9]:

- микропроцессорная реализация;
- реализация на программируемой логике;

- реализация на заказных микросхемах.

Устройства на программируемой логике вследствие возможности выполнения параллельной обработки информации имеют потенциально большее системное быстроедействие, чем на микропроцессорах [10,11].

Однако для микропроцессорной реализации доступны более сложные логические алгоритмы обработки информации. Возможность раздельной обработки на микропроцессорах и программируемой логике известна [12,13]. Однако непрерывное усложнение методов цифровой обработки информации требует не только экстенсивного роста показателей элементной базы (быстродействия и количества эквивалентных вентилей), но и новых архитектурных решений системного уровня интеграции [14,15].

При решении сложных задач, например обработки изображений [2,6], требуется сочетание преимуществ двух классов методологий реализации: программной и аппаратной, что возможно только при принципиально новом подходе – использовании технологии «системы на кристалле». Это обусловлено существенным прогрессом технологии производства интегральных схем [16,17].

В настоящее время степень интеграции достигает миллиарда вентилей на кристалле, а минимальные технологические нормы уже составляют 30 нм и ниже. При разработке микроэлектронных изделий необходимо учитывать следующие факторы:

- в условиях рынка прибыль от изделий электроники в значительной степени зависит от временных затрат на проектирование;

- увеличение степени интеграции делает задачу верификации (тестирования) микросхем качественно более сложной;

- технические параметры интегральных микросхем, такие как производительность, площадь кристалла и потребляемая мощность, являются ключевыми элементами в продвижении товара на рынок;

- команды разработчиков высокоинтегрированных микросхем обладают различными знаниями и опытом в области проектирования и часто при выполнении проектов разнесены территориально.

Использование современных программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и субмикронных технологий в транспортной отрасли в качестве технологической платформы для создания интеллектуальных транспортных видеосистем (ИТВС) позволяют интегрировать на одном кристалле функции анализа (обнаружения, слежения и распознавания) с максимизацией битовой скорости передачи видеoinформации, полученной с разных камер наблюдения в реальном времени.

Кроме того, транспортная инфраструктура получает неоспоримые преимущества:

- снижение расходов на внедрение техники видеоаналитики;

- возможность реконфигурации и репрограммирования под текущие нужды проекта;

- повышение надежности изделия;
- возможность прототипирования изделий для особых условий эксплуатации, что является важнейшим фактором при решении задач оперативного наблюдения и принятия решения.

Существует два основных направления в реализации ИТВС на основе СнК: первое – в виде заказных или полузаказных интегральных схем специализированного назначения (Application-Specific Integrated Circuit – ASIC), изготавливаемых на основе фотоматриц [2,6], второе – в базе ПЛИС (Field Programming Gate Array – FPGA), которые имеют возможность реконфигурирования за счет смены содержимого конфигурационной памяти.

### 1. Модифицированный маршрут проектирования ИТВС

Традиционный подход к проектированию изделий микроэлектроники для ИТВС не оправдывает себя. Исходя из производительности разработчика порядка ~200 вентилей в день и сложности микросхем порядка более 100 млн. вентилей, для разработки такой микросхемы потребуется работа 500 человек в течение одного года, что, безусловно, неприемлемо с точки зрения себестоимости разработки [2,6].

Кроме того, при производстве изделий микроэлектроники постоянно растет доля затрат на разработку программного обеспечения [18]. Поэтому при раздельной разработке программной и аппаратной составляющих резко возрастает вероятность появления ошибок на всех этапах маршрута проектирования ИТВС на основе ASIC, что также приводит к дополнительным затратам.

Выход из создавшейся ситуации состоит в изменении и совершенствовании методологии проектирования изделий микроэлектроники, и наиболее перспективным направлением представляется методология проектирования СнК, включающая начальный этап синтеза устройств кодирования, опирающийся на учет весовых коэффициентов вектора концепции системы в целом [19].

Различные методологии реализации предполагают и различные технологии проектирования устройств на их основе. Методология проектирования устройств обработки видеoinформации на основе технологии СнК в настоящее время является достаточно новой и требует совершенствования и модификации.

Основная трудность проектирования ИТВС не в том, чтобы создать устройство, принципиально реализующее заданные функции, а в том, чтобы добиться требуемых параметров этого устройства.

Одна из проблем при проектировании ИТВС состоит в создании специализированной электронной компонентной базы транспортной специфики в виде сложно-функциональных блоков (СФ-блоков, в англ. лит. IP-core) в составе ИТВС. Практика показывает, что стоимость СФ-блока в среднем в несколько раз превышает стоимость аналогичного однократно используемого блока, а для процессоров эта величина на порядок выше. По этой причине гусе-блоки предназначены для общих логически формализуемых задач, например для кодирования изображения (MPEG, wavelet). СФ-блоки являются рыночным товаром, в западных странах объем продаж IP-блоков оценивается на уровне свыше 10 млрд. долларов в год. Например, широко распространенные процессорные ядра ARM7, ARM9 стоят порядка сотен тысяч долларов для конкретного применения [2,6,11].



В процессе проектирования ИТВС разработчик имеет возможность выбора следующих решений:

- самостоятельная разработка необходимых СФ-блоков;
- покупка СФ-блоков у ведущих разработчиков и производителей микросхем;
- поиск и применение СФ-блоков, предоставляемых в открытом доступе (www.opensource и др. источники).

Каждый из этих вариантов имеет свои достоинства и недостатки. Как уже отмечалось, самостоятельная разработка всех СФ-блоков может привести к увеличению сроков проектирования и задержке выпуска конечного изделия. Покупка СФ-блоков сопряжена с определенными финансовыми затратами, повышающими стоимость разработки. Применение СФ-блоков, имеющих в свободном доступе, возможно только после их тщательной верификации, что требует обычно значительных

временных затрат. При выполнении каждого проекта разработчик должен провести оценку поставленных требований и имеющихся ресурсов, чтобы выбрать оптимальный вариант реализации СНК.

Таким образом, основная особенность проектирования СНК – возможность использования достаточно широкой номенклатуры синтезируемых СФ-блоков, имеющих на рынке и в свободном доступе, которые могут быть реализованы на базе различных функциональных библиотек и технологий и интегрированы в кристалл средствами современных САПР.

Как было отмечено ранее, принципиальная особенность систем на кристалле – это наличие программируемых блоков, поэтому системы на кристалле – это не просто интегральная схема, а комплекс, в состав которого входит как аппаратная часть (собственно кристалл), так и программная –

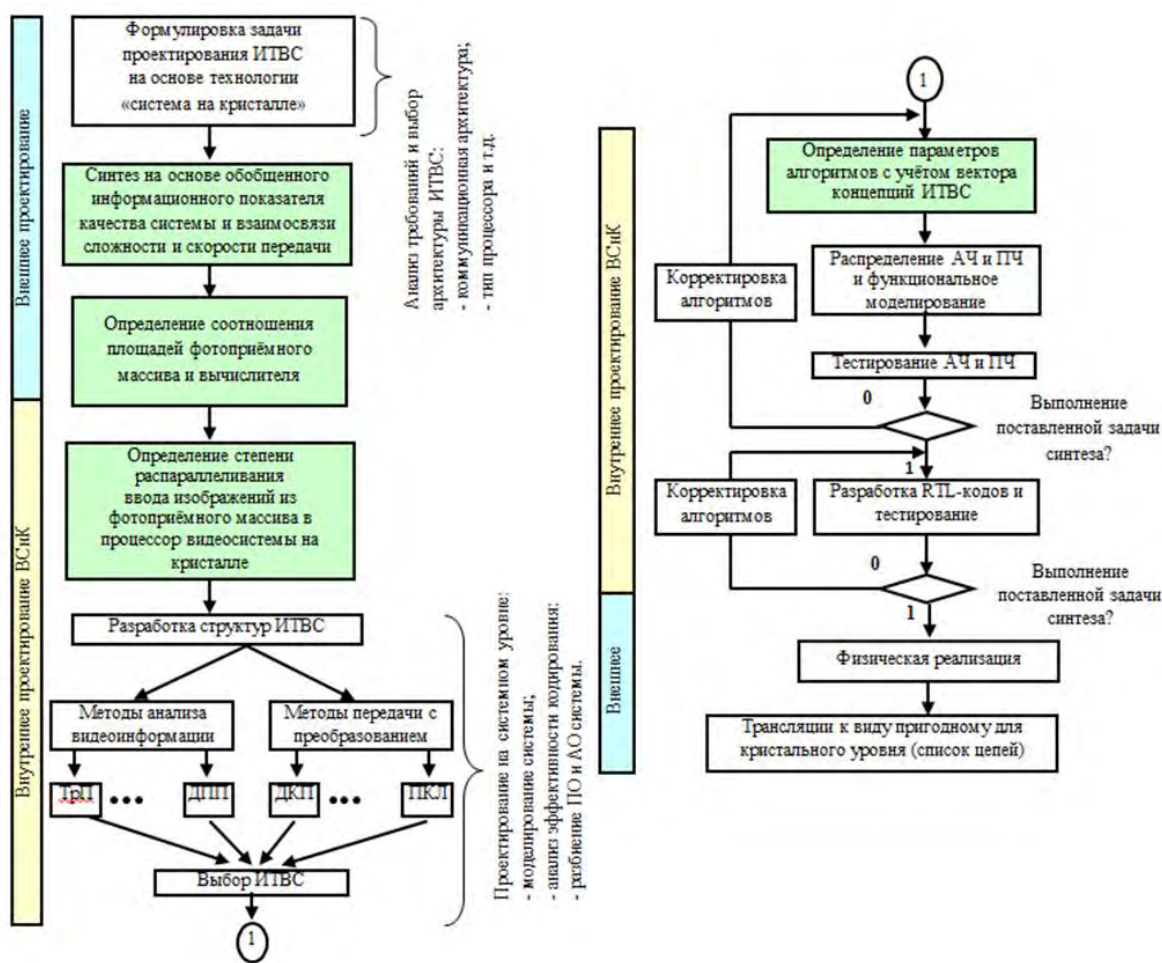


Рис. 1 – Модифицированный концептуальный маршрут проектирования ИТВС

- встраиваемое программное обеспечение.

Следовательно, маршрут проектирования должен включать, кроме операции по совместной верификации и отладке программной и аппаратной частей проекта, еще и учет информационных показатели системы в соответствии с эталоном, определяемом на начальном этапе, поскольку система на кристалле – изделие не только сложное, но и дорогое при небольших объемах выпуска, ошибки проектирования должны быть исключены.

Поэтому в маршрут проектирования должны быть включены этапы по совместной верификации цифровой, аналоговой и цифро-аналоговой частей проекта (Рис. 1).

Основными операциями, выполняемыми ИТВС при анализе видеoinформации, являются:

- выделение опорных точек объектов изображений;
- триангуляционное преобразование (ТрП);

- дискретное пространственное преобразование (ДПП);

А операциями, выполняемыми ИТВС при передаче видеоинформации, являются:

- дискретное косинусное преобразование (ДКП);
- преобразование Коронена-Лоева (ГКЛ).

Для проектирования ИТВС на основе СнК необходимо на начальном этапе выполнить следующее (Рис. 1):

- разработать цели спецификации системы;
- выбрать тип камеры;
- исследовать и разработать архитектуру ИТВС;
- разработать системы управления видео;
- решить вопросы по хранению видеоданных;
- разработать методы и алгоритмы видеоаналитики;
- определить систему отображения информации.

Основная идея в развитии методологии проектирования заказных микросхем транспортные спецификации – это использование в проекте уже готовых функционально законченных блоков. Примерно так, как это делается при разработке системы на плате с использованием универсальных микросхем.

При модификации маршрута для проектирования ИТВС важен учёт как требований внешнего проектирования, так и требований внутреннего проектирования.

## 2. Требования внешнего проектирования

Данный этап проектирования ИТВС включает следующие задачи:

- 1) Синтез системы на основе обобщенного информационного показателя эффективности, и взаимосвязи ее информационных показателей качества, предложенных авторами в работах [5,20];
- 2) Определение соотношения площадей фотоприёмного массива и вычислителя;
- 3) Разработка заказных микросхем на основе уже готовых СФ-блоков. (Основной методологии является совместимость СФ-блоков в системе);
- 4) Разработка кристалла и тестирование в целом.

## 3 Требования внутреннего проектирования

Данный этап проектирования ИТВС включает следующие задачи:

- 1) Разработка методов решения задач обнаружения объектов транспорта и алгоритмов анализа для их распознавания;
- 2) Разработка методов решения задач доставки и алгоритмов преобразования видеоинформации в реальном масштабе времени с заданной точностью;
- 3) Разработка параллельных алгоритмов анализа и передачи видеоинформации;
- 4) Исследование и выбор оптимальных аппаратной и программной частей (АЧ и ПЧ) и средств реализации проекта;
- 5) Разработка всех компонентов ИТВС проекта на уровне регистровых передач (RTL-реализация);
- 6) Разработка СФ-блоков;
- 7) Верификация СФ-блоков и тестирование аппаратного и программного обеспечения проекта в целом.

Для реализации специализированных транспортных СФ-блоков, как специализированной электронно-компонентной базы, необходимо создать инфраструктуру с соответствующими

материально-техническими и людскими ресурсами [2,6].

В большинстве случаев СнК представляет собой цифровую сверхбольшую интегральную схему (СБИС), которая может содержать ряд аналоговых и цифровых блоков. Поэтому для проектирования ИТВС на основе СнК требуются те же методы и средства, что и для классических СБИС. Эти средства реализованы в виде систем автоматизированного проектирования (САПР) на базе схем с программируемой логикой различных фирм производителей ПЛИС [2,6].

В качестве элементной базы эти САПР используют библиотеки функциональных элементов, в состав которых входят как простые логические вентили и триггеры, так и макроэлементы, выполняющие более сложные функции: регистры, счетчики, сумматоры, умножители, арифметико-логические устройства и т.д.

Следует отметить, что при разработке микроконтроллеров в 90-х годах прошлого века широкое распространение получила концепция создания микроконтроллерных семейств, имеющих одинаковое процессорное ядро и различающихся набором периферийных устройств и объемом внутренней памяти. Для реализации этой концепции при проектировании СБИС микроконтроллеров кроме функциональных библиотек стали использоваться СФ-блоки: процессоры, таймеры, АЦП, различные интерфейсные блоки (UART, SPI, CAN, Ethernet и т.д.). Эти СФ-блоки формировали верхний уровень функциональных библиотек, используемых разработчиками и производителями микроконтроллеров. Они были достаточно жестко ориентированы на конкретную технологию компании-производителя, являясь внутрифирменной материальной ценностью.

Повышение сложности проектируемых СБИС и, в частности, видеосистем на кристалле (ВСнК), с жесткими требованиями к качеству и скорости обработки видеоинформации, привели к разработке нового подхода к проектированию устройств телекоммуникации для обработки видеоданных. В традиционном маршруте проектирования все блоки разрабатываются заново и оптимизируются для конкретного применения. В маршруте проектирования ВСнК блоки отбираются по принципу совместимости без оптимизации их параметров для данного проекта.

Для решения проблемы синтеза ВСнК в работе выделены три принципиальные, характеризующие решаемую проблему особенности кодирующих устройств класса СнК и ВСнК, которые должны иметь отражение в маршруте проектирования видеосистем (Рис. 1):

- при синтезе устройств следует учитывать не только скорость передачи и точность кодирования, но и сложность (число операций, необходимых для кодирования источников изображений);
- проектирование видеосистем на кристалле – неразрывный, не допускающий декомпозиции системы на подсистемы процесс, в ходе которого фотоприёмник и устройство компьютерной обработки должны оптимизироваться совместно;
- при создании быстродействующих видеосистем на кристалле следует опираться на модель операционного устройства с множественным

потоком данных и включать в принятый маршрут проектирования определение степени параллелизма передачи сигналов от массива фотоприёмных элементов к кодеру-вычислителю.

Известно, что для успешного выполнения любого сложного проекта необходимо организовать его иерархическую декомпозицию – выделить простые составные части.

Иерархическое деление проекта возможно в двух направлениях – снизу-вверх и сверху-вниз – и базируется на концепции абстракции проекта.

Определяющим фактором в построении СБИС класса ВСнК является то, что разработка проекта начинается с системного уровня. Обычно система-прототип существует в виде многокомпонентного устройства на одной или нескольких печатных платах и задача разработчика системы на кристалле перенести её внутрь кристалла, сохранив или увеличив её производительность.

Разработка СБИС требует тщательной организации взаимодействия разработчиков на всем маршруте проектирования. Структура такого взаимодействия приведена на рисунке 2.

Разработчиками конечных устройств составляются требования к элементной базе. Эти требования используются разработчиками СБИС в качестве исходной точки формирования проекта. Сам процесс проектирования СБИС при этом укладывается в традиционный маршрут разработки микросхем типа ASIC [6]. Сформированный проект СБИС передается на изготовление на кремниевую фабрику. Готовые микросхемы не являются конечным продуктом. Для того чтобы микросхема могла быть использована разработчиками конечных устройств, необходимо сформировать комплексное решение, включая прототип устройства на базе СБИС и программное обеспечение, включая операционную систему с комплектом драйверов устройств, библиотеки, реализующие ключевые функции системы и демонстрационное ПО.

Определяющим фактором в разработке программного обеспечения является наличие в системе на кристалле ведущего процессора. Как правило, в качестве основного процессора выбирается устройство с широко известной и используемой системой команд. В этом случае обеспечивается возможность использовать ПО сторонней разработки, что значительно сокращает и облегчает работу.

С другой стороны, каждая система на кристалле имеет свой уникальный набор дополнительных устройств, начиная с устройств цифровой обработки сигналов и заканчивая различными периферийными и интерфейсными устройствами. Работа с функциями и устройствами, уникальными для данной системы, осуществляется специализированным программным обеспечением, которое может создаваться для каждого проекта в отдельности и, зачастую, содержит именно ту существенную функциональную часть системы на кристалле, которая отличает ее от других таких же.

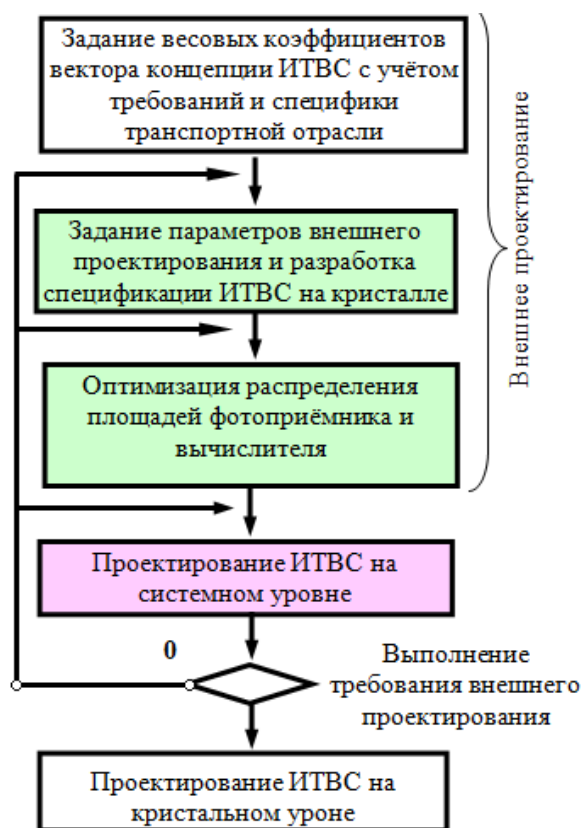


Рис. 2. Упрощенная схема взаимодействия разработчиков ИТВС

Как правило, работой системы управляет операционная система. В таком случае организация управления периферийными устройствами сводится к написанию драйверов устройств, которые для общеупотребляемых интерфейсов стандартны.

Следует учитывать и обратный эффект. Если общеупотребляемый компонент ПО поддерживает определенное множество функций, то расширение этого множества в аппаратуре может оказаться неэффективным, так как не будет поддержано в ПО и не будет использоваться.

Таким образом, выбор используемого стандартного ПО напрямую влияет на выбор функциональности аппаратуры системы и должен быть сделан на этапе формирования требований к СБИС.

Разработка систем на кристалле неотделима от разработки устройств на основе микросхем повторного использования и микросхем с программируемой структурой. Система на кристалле разрабатывается для определенного приложения, устройства или набора устройств. В этих устройствах, помимо системы на кристалле, присутствуют и другие элементы, взаимодействие и интерфейс с которыми должны быть обеспечены в полном объеме.



### Заключение

Постоянный рост требований к интеллектуальным транспортным видеосистемам для решения вопросов обеспечения безопасности приводит к расширению требований по функциональным и эксплуатационным характеристикам, что заставляет разрабатывать все более сложные устройства. В то же время значительный прогресс в создании современных субмикронных технологий (20 нм и менее) позволяет создавать кристаллы со степенью интеграции более миллиарда вентилях на одном кристалле. В этом случае традиционные маршруты проектирования становятся менее эффективными с точки зрения выхода годных видеосистем на кристалле.

Повышение эффективности проектирования на базе СнК при объединении на одном кристалле аналоговой (фотоприёмника) и цифровой (вычислителя) частей проекта может быть обеспечено следующим образом:

1) Модификацией маршрута проектирования с начальным этапом внешнего проектирования, учитывающего информационные показатели системы (точность, скорость и сложность) на основе функционала вектора концепции системы [19] и разработкой параллельных пространственных алгоритмов для анализа видеоданных и их

спектральных преобразований для передачи по каналу связи.

2) Созданием специализированной библиотеки электронной компонентной базы транспортной специфики с учетом требования отрасли.

Такая библиотека должна содержать сложно-функциональные блоки – составляющие компоненты проектируемой интеллектуальной транспортной видеосистемы, реализующие алгоритмы распознавания видеоинформации и ее доставку в реальном масштабе времени.

Следует отметить, благодаря сходству маршрутов проектирования систем на базовых матричных кристаллах (БМК), ПЛИС и ASIC, широкой доступности целевых кристаллов и средств отладки постепенно стирается грань между различными методиками проектирования [2,6]. Сегодня практика применения языков высокого уровня и ПЛИС-прототипирования позволяет уменьшить сроки разработки сложных систем и сократить риск отказа начальной производственной партии микросхем с увеличением числа годных. Для проектирования интеллектуальных транспортных видеосистем на схемах с программируемой логикой есть большие возможности подобрать нужные элементы в виде СФ-блоков и выполнить отладку на аппаратном уровне.

### Литература

1. Aldasouqi I, Hassan M. Human face detection system using HSV. In: Proceedings Ninth WSEAS Int. Conf. On Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal Processing. Stevens Point, Wisconsin, USA: World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS); 2010. pp. 13-16.
2. Бухтеев А.В. Методы и средства проектирования систем на кристалле. // Chip news, 2003, №4, С. 4–14.
3. Цыцулин А.К., Фахми Ш.С. Видеосистемы на кристалле: новые архитектурные решения в задачах обработки видеоинформации//Датчики и системы. 2011. № 4. С. 58-61.
4. Манцветов А.А., Зубакин И.А., Козлов В.В., Фахми Ш.С., Цыцулин А.К. Адаптация космической телевизионной системы к этапам наблюдения объектов// Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2012. № 1. С. 29-43.
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.
6. Немудров В. Г. , Мартин. М. Системы на кристалле. Проектирование и развитие. М., Техносфера, 2004. 216 с.
7. Березин В.В., Фахми Ш.С. Аппаратно-программные средства для проектирования цифровых устройств. учебное пособие / В. В. Березин, Ш. С. Фахми ; Федеральное агентство по образованию, Санкт-Петербургский гос. электротехнический ун-т "ЛЭТИ". Санкт-Петербург, 2005.
8. Еременко С.П., Алексеенко Я.В., Еид М.М., Фахми Ш.С. Интеллектуальные информационные системы космического мониторинга// В сборнике: Транспорт России: проблемы и перспективы - 2015 Материалы Юбилейной Международной научно-практической конференции. 2015. С. 91-99.
9. Фахми Ш.С. Развитие триангуляционного подхода кодирования и декодирования нестационарных изображений// Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2010. № 3 (18). С. 81-90.
10. Фахми Ш.С., Еид М.М., Костикова Е.В., Мукало Ю.И., Крюкова М.С., Зайдулин С.М. Классификация транспортных средств в реальном времени// Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 3. С. 89-94.
11. Березин В., Золотуха Р., Фахми Ш. Отладка аппаратно-программного обеспечения реконфигурируемых систем на кристалле семейства А7 ФИРМЫ TRISCEND// Компоненты и технологии. 2003. № 7 (33). С. 118-122.
12. Фахми Ш.С., Еид М.М., Костикова Е.В., Альмахрук М.М. Систематизация алгоритмов обработки видеоинформации в системах видеонаблюдения// В сборнике: Транспорт России: проблемы и перспективы - 2017 Материалы Международной научно-практической конференции. ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук. 2017. С. 350-355.
13. 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.
14. Фахми Ш.С., Лабеецкий А.В. СФ-блок для оценки скорости записи и чтения видеоинформации в sd-картах портативных устройств// Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2014. № 1. С. 107-115.



15. Фахми Ш.С., Алексеенко Я.В., Костикова Е.В. Интеллектуальные транспортные видеосистемы на основе технологии "система на кристалле"// Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2015. № 6. С. 130-134.
16. Фахми Ш.С., Крюкова М.С., Алексеенко Я.В., Салем А. Видеосистема космического мониторинга мчс россии для принятия управленческих решений// 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. 236-243.
17. Бобровский А.И., Алексеенко Я.В., Фахми Ш.С. Реализация параллельной обработки видеoinформации на основе пространственно-рекурсивного метода// Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 5. С. 31.
18. Фахми Ш.С., Алексеенко Я.В., Костикова Е.В. Интеллектуальные транспортные видеосистемы на основе технологии «система на кристалле»// Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 6. С. 51.
19. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. М., Наука, 1981. – 488 с.
20. 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.

#### References

1. Aldasouqi I, Hassan M. Human face detection system using HSV. In: Proceedings Ninth WSEAS Int. Conf. On Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal Processing. Stevens Point, Wisconsin, USA: World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS); 2010. pp. 13-16.
2. Bukhteev A.V. Methods and tools for designing systems on a crystal. // Chip news, 2003, no. 4, pp. 4-14.
3. Sycolin A. K., Fahmi S. S. Video system-on-chip: new architectural solutions in problems of image processing Sensors and systems. 2011. No. 4. Pp. 58-61.
4. Mantsvetov A. A., Zubakin I. A., Kozlov V. V., Fahmi sh. S., Tsitsulin A. K. Adaptation of the space television system to the stages of object observation/ / Questions of Radioelectronics. Series: television Technology. 2012 No. 1. Pp. 29-43.
5. Bobrovsky A. I., Eid M. M., Almahruk M. M., Salem A., Fahmi sh. s. Information indicators of the quality of image encoding devices by reference points/ / Questions of Radioelectronics. Series: television Technology. 2016. No. 3. Pp. 86-91.
6. Nemudrov V. G., Martin. M. Systems on a chip. Design and development. Moscow, Technosphere, 2004. Pp. 216- 229.
7. Berezin V. V., Fahmi sh. S. Hardware and software tools for designing digital devices. textbook / V. V. Berezin, sh. s. Fahmi; Federal Agency for education, St. Petersburg state electrotechnical University "LETI". Saint Petersburg, 2005.
8. Eremenko S. P., Alekseenko Ya. V., Eid M. M., Fahmi sh. S. Intelligent information systems of space monitoring/ / in the collection: Transport of Russia: problems and prospects-2015 Materials of the Anniversary International scientific and practical conference. 2015. Pp. 91-99.
9. Fahmi, S. S. the Development of a triangulated approach of coding and decoding of nonstationary images// Bulletin of Pacific national University. 2010. No. 3 (18). Pp. 81-90.
10. Fahmi sh. S., Eid M. M., Kostikova E. V., Mukalo Yu. I., Kryukova M. S., Zaydulin S. M. Classification of vehicles in real time/ / Questions of Radioelectronics. Series: television Technology. 2018. No. 3. Pp. 89-94.
11. Berezin V., Zolotukho R., Fahmi sh. Debugging hardware and software for reconfigurable systems on a chip of the A7 family of TRISCEND COMPANY/ / Components and technologies. 2003. No. 7 (33). Pp. 118-122.
12. Fahmi sh. S., Eid M. M., Kostikova E. V., Almahruk M. M. Systematization of video information processing algorithms in video surveillance systems// in the collection: Transport of Russia: problems and prospects-2017 Materials of the International scientific and practical conference. INSTITUTE of transport problems. N. S. solomenko of the Russian Academy of Sciences. 2017. Pp. 350-355.
13. Fahmi sh. S., Kostikova E. V., Kryukova M. S., Seliverstov S. A. Video system for detecting marine vessels using triangulation grids// Marine intelligent technologies. 2018. No. 1-3 (41). Pp. 143-155.
14. Fahmi sh. S., Labetsky A.V. SF-block for evaluating the speed of recording and reading video information in sd-cards of portable devices/ / Questions of radio electronics. Series: television Technology. 2014. No. 1. Pp. 107-115.
15. Fahmi sh. S., Alekseenko Ya. V., Kostikova E. V. Intelligent transport video systems based on the "system on a crystal" technology// Questions of Radioelectronics. Series: television Technology. 2015. No. 6. Pp. 130-134.
16. Fahmi sh. S., Kryukova M. S., Alekseenko Ya. V., Salem A. Video system of space monitoring of the Russian emergencies Ministry for making management decisions// in the collection: Technologies for building cognitive transport systems Materials of the all-Russian scientific and practical conference. INSTITUTE of transport problems. N. S. solomenko of the Russian Academy of Sciences. 2018. Pp. 236-243.
17. Bobrovsky A. I., Alekseenko Ya. V., Fahmi sh. S. Implementation of parallel processing of video information based on the space-recursive method. Voprosy Radioelectronics. 2016. No. 5. P. 31.
18. Fahmi sh. S., Alekseenko Ya. V., Kostikova E. V. Intelligent transport video systems based on the "system on a crystal" technology// Questions of Radioelectronics. 2017. No. 6. P. 51.
19. Moiseev N. N. Mathematical problems of system analysis. Moscow, Nauka, 1981. – 488 p.
20. Tsitsulin A. K., Fahmi sh. S., Zubakin I. A. Initial stage of designing a continuous signal source encoder/ / Questions of radio electronics. Series: television Technology. 2010. No. 2. Pp. 17-34.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Шакиб Субхиевич Фахми**, доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, корпус 1, помещение 11-53. Тел. +7(812) 234-36-75. e-mail: [shakeebf@mail.ru](mailto:shakeebf@mail.ru).

**Shakeeb S. Fahmi**, professor, Dr.Sci. (Eng), professor of the Department of computer-aided design, Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI', room 11-53, building 1, 5, Professor Popov str., St. Petersburg, 197376, Russian Federation. Tel. +7(812) 234-36-75. e-mail: [shakeebf@mail.ru](mailto:shakeebf@mail.ru).

**Олег Александрович Королев**, научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, 12-я линия ВО, д.13. Тел. +7(812) 321-95-68, e-mail: [korolev@iptran.ru](mailto:korolev@iptran.ru).

**Oleg A. Korolev**, researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. Tel. +7(812) 321-95-68, e-mail: [korolev@iptran.ru](mailto:korolev@iptran.ru).

**Юрий Евгеньевич Крылов**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, В.О. 12 линия, 13. Тел. +7(812) 321-95-68, e-mail: [krylov\\_yuriy@mail.ru](mailto:krylov_yuriy@mail.ru).

**Yuriy E. Krylov**, PhD in Engineering Science, senior researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation. Tel. +7(812) 321-95-68, e-mail: [krylov\\_yuriy@mail.ru](mailto:krylov_yuriy@mail.ru).

**Елена Валентиновна Костикова**, кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования и прикладной информатики, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7., Тел.: +7(812)748-96-45, м.т. 768, e-mail: [kostikova.ev@mail.ru](mailto:kostikova.ev@mail.ru).

**Elena V. Kostikova**, PhD in Engineering Science, senior lecturer of the Department of mathematical modeling and applied Informatics, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya str, St. Petersburg, 198035, Russian Federation., Tel. +7(812) 748-96-45, i.p. 768, e-mail: [kostikova.ev@mail.ru](mailto:kostikova.ev@mail.ru).

## УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 656.2:656.61.052: 629.5.07  
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.013

## Нелинейная модель динамической системы прогнозирования расхода топлива судна с использованием нейронной сети

В.И. Филатов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова

**Аннотация.** В современных условиях коммерческого судоходства, большое внимание уделяется вопросам оптимизации расхода топлива на судах. Наиболее критическим моментом, определяющим эффективность рейса, является количество бункерного топлива, использованного на морском переходе судном.

В данной статье предложен подход к прогнозированию расхода топлива на предстоящем переходе судна с помощью использования нейронной сети, обученной с помощью алгоритма Левенберга-Марквардта, а также рассмотрено преимущество данного метода в сравнении с методами других исследователей.

Статистическая выборка для машинного обучения составлена на основе эксплуатационных данных с танкера класса «Афрамекс». Элементом новизны в данной работе является формирование данных для обучающего множества, а также возможность нелинейного прогнозирования посуточного приращения скорости.

Данный метод имеет высокую точность и может применяться как фрахтователем, так и судоводителем для того, чтобы оценить экономическую эффективность предстоящего рейса или выбрать оптимальный маршрут по параметру расхода топлива.

Ещё одной задачей прогнозирования параметров судна на переходе с помощью нейронной сети является расчёт ожидаемых приращений скорости судна, что таблица расходов бункерного топлива может быть применена только при условиях не более 4-5 баллов во шкале Бофорта.

**Ключевые слова:** нейросеть, метод Левенберга-Марквардта, машинное обучение, статистическая выборка, расход топлива, погодные потери скорости судна, искусственный интеллект.

## Nonlinear model of a dynamic system for forecasting of fuel consumption of a ship using a neural network

Victor I. Filatov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Of Admiral Ushakov Maritime State University

**Abstract.** In modern conditions of commercial shipping, much attention is paid to the optimization of fuel consumption on the sea. The most critical moment determining the voyage's efficiency is the amount of bunker fuel used by the ship at the sea passage.

This article proposes an approach to forecasting fuel consumption at the upcoming passage of a vessel using a neural network taught-in by the Levenberg-Marquardt algorithm, and also considers the advantage of this method in comparison with methods of other researchers.

The statistical sample for machine learning is based on operational data from an "Aframax" class tanker. The novelty element in this work is the formation of data for the training set, as well as the possibility of nonlinear forecasting of the daily increment of speed.

This method is highly accurate and can be used by both the charterer and the navigator in order to evaluate the economic efficiency of the upcoming voyage or to choose the optimal route according to the fuel consumption parameter.

Another task of predicting the parameters of a vessel at a passage using a neural network is to calculate the expected increments of the vessel's speed, with that the table of bunker fuel consumption can be applied only under conditions of no more than 4-5 points on the Beaufort scale.

**Keywords:** network, Levenberg-Marquardt method, machine learning, statistical sampling, fuel consumption, weather loss of a ship's speed, artificial intelligence.

### Введение

В морской индустрии в настоящее время вопросы, связанные с минимизацией расхода бункерного топлива судами, стоят очень остро.

Показателями актуальности процесса оптимизации является не только тенденция увеличения стоимости топлива на бункерном рынке, но и ужесточение требований, предъявляемых к бункерному топливу. [5,9] С 1 января 2020 года вступили новые требования ИМО к качеству бункерного топлива, а именно ужесточились нормы, серьезно сокращая максимальное содержание серы в топливе с 3,5% до 0,5%, что благоприятно отразится на окружающей среде. С точки зрения

судовождения, наиболее важным вопросом экономической эффективности, является соответствие действительных данных о расходе бункерного топлива судна на переходе ( $Q_a$ ) и расходом, заявленным судовладельцем ( $Q_n$ ) при условии соблюдения выполнения скорости, заданной фрахтователем ( $V_{c/p}$ ) (индекс c/p-«charter party»). При фрахтовании судов, совершающих морские и трансокеанские переходы, в тайм-чартер, составляется договор о перевозке – Чартер партия (Charter party). Данные о представляются на основании таблиц данных (пример в таблице 1), полученных на ходовых испытаниях судна для разных степеней загрузки (в грузу/ в балласте), для различных ступеней хода главного двигателя и

различного количества оборотов главного двигателя- RPM.

Таблица 1

Пример таблицы расходов топлива для танкера класса «Афромакс»

В балласте			В полном грузу		
V, узл	RPM	Q, т/сут	V, узл	RPM	Q, т/сут
12	65	18.6	12	68.5	24
13	72.5	24	13	75.5	30.8
14	78	31	14	83.5	38
i+1	-	-	i+1	-	-

### 1. Проблемы прогнозирование расхода топлива с помощью заявленных данных

Одним из наиболее критических условий договора является положение о компенсации стоимости на затраченное топливо в случае перерасхода, что обуславливает актуальность вопроса об оптимальном учёте бункерного топлива. Данное требование изложено в проформах чартер-партий основных грузовладельцев наливных грузов (Oil majors). [8]

Данный метод прогнозирования расходов бункерного топлива имеет ряд проблем:

1. Натурные данные могут считаться точными в определённых гидрометеорологических условиях. В условиях ветра более 4-5 баллов по шкале Бофорта, заявленные данные применять нецелесообразно, и этот факт приведён в табличных данных о расходе бункерного топлива.

2. Существующие зависимости влияния полного вектора гидрометеорологической обстановки на судно являются эмпирическими, имеют ограниченные условия применения. Линейные приближённые решения с большим объёмом данных имеют большое количество переменных коэффициентов, определение которых имеет субъективный эмпирический характер.

3. Одни и те же данные могут быть применены для целого типа судов одной серии, хотя в действительности каждое конкретное судно может иметь свою специфику работы ГД и свои данные расхода топлива.

4. За последние несколько лет, появилась тенденция в пристальном контроле за параметрами эксплуатации судна со стороны фрахтователя, выраженная в анализе факторов перерасхода через ежедневные отчёты, отправляемые капитаном с судна- «Noon reports».

5. Данные расхода бункерного топлива не учитывают промежуточных степеней загрузки судна.

### 2. Задача обучения нейронной сети

В данной работе предлагается рассмотреть нелинейное решение задачи прогнозирования расхода бункерного топлива. Разработки в этой области ведут азиатские исследователи: Zhihui Hu, Yongxin Jin, Qinyou Hu, Jun Yuan и другие. [9]

В качестве математического аппарата предлагается использовать нейронную сеть прямого распределения. Обучение нейронной сети выполнено с помощью метода Левенберга-Марквардта (ЛМ) в среде «Матлаб».

Цель обучения НСПР – определение такого вектора весов, чтобы функция принимал минимальное значение, что превращает процесс обучения сети в решение задачи безусловной оптимизации: [1]

$$\mathbf{w} = \arg \min_{\mathbf{w} \in \mathbb{R}^m} E(\mathbf{w}) \quad (1)$$

где:  $E(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N e_i^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (y_i(\mathbf{w}) - \tilde{y}_i)^2$  - степень

соответствия сети данным из обучающей выборки задаётся функцией качества обучения. [3]

Алгоритм Левенберга-Марквардта (ЛМ) является квази-ньютоновским методом оптимизации, который предназначен для оптимизации параметров нелинейных регрессионных моделей с большим значением входных параметров. Предполагается, что в качестве критерия оптимизации используется среднеквадратичная ошибка ( $e_i$ ) [1,3,7]

В матричном виде можно записать:

$$\mathbf{e}_i(\mathbf{w}) = \mathbf{e}(n) + \mathbf{J}(n)(\mathbf{w} - \mathbf{w}(n)) \quad (2)$$

Где  $\mathbf{J}(n)$ - матрица Якоби (якобиан) производных первого порядка:

$$\mathbf{J}(n) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial w_1} & \frac{\partial e_1}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_1}{\partial w_m} \\ \frac{\partial e_2}{\partial w_1} & \frac{\partial e_2}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_2}{\partial w_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial e_n}{\partial w_1} & \frac{\partial e_n}{\partial w_2} & \dots & \frac{\partial e_n}{\partial w_m} \end{bmatrix} \quad (3)$$

В данном случае якобиан является транспонированной матрицей градиента функции ошибки  $\nabla g = \mathbf{J}^T \mathbf{e} = \mathbf{J}^T (y_i(\mathbf{w}) - \tilde{y}_i)$ .

Блок-схема алгоритма обучающего цикла НСПР методом Левенберга-Марквардта представлена на рисунке 1.



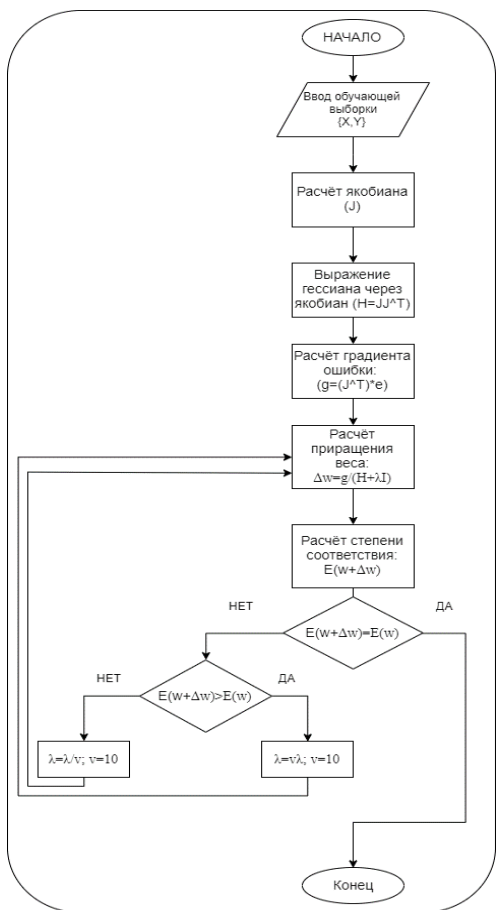


Рис. 1. Алгоритм обучающего цикла НСПР методом ЛМ.

### 3. Формирование обучающей выборки

В данном примере формирование массива данных для обучающей выборки выполнено на основе действительных натуральных данных, полученных в результате эксплуатации танкера класса «Афрамекс». Данное судно построено на южнокорейском заводе «Hyundai» в 2015 году и имеет двигатель типа «MAN B&W 6G60ME-C9.2»

Данные для обучающего множества выбраны на основании «abstract logs»-проформы учёта параметров судна во время перехода в условиях океанского перехода, открытого моря, прибрежного плавания, якорной стоянки и т.д. Период наблюдения за объектом исследований составляет 3,5 года. Приблизительно 75% от данных «abstract logs» были использованы для формирования сигнала входного и выходного массива обучения.

Входной сигнал обучающей выборки имеет вид:

$$\tilde{X} = \{RPM_{ME}, L_i, W_{wind}, C_s, W_{wave}\} \quad (4)$$

где:  $RPM_{ME}$  - обороты ГД, заданные судоводителем на телеграф,  $L_i$  - степень нагрузки ГД,  $W_{wind} = \sqrt{(W \cdot \cos KY)^2 + (W \cdot \sin KY)^2}$  - матрица векторов ветра, относительно вектора движения судна, KY-курсовой угол истинного ветра,  $C_s = \sqrt{(V \cdot \cos KY)^2 + (V \cdot \sin KY)^2}$  - матрица векторов течений,  $W_{wave}$  - матрица векторов волнения: {«+»

если волна попутная, «-»- если встречная}, КУ-курсовой угол течения, ветра, волнения.

Выходной сигнал обучающей выборки имеет вид:

$$\tilde{Y} = \{S_a, Q_{ME}\}$$

где:  $S_a$  - действительное расстояние, пройденное судном за сутки, м. мили,  $Q_{ME}$  - расход топлива судном за сутки, тонны.

Выходной позволяет определить действительное приращение скорости под влиянием внешнего воздействия гидрометеорологических факторов, представлен в выражении 5:

$$\Delta V_{ГМУ} = |V_{гpm} - V_a| \quad (5)$$

### 4. Обучение нейронной сети

В процессе обучения, выборка разделена на три множества: обучающая (training), тестовая (testing), контрольная (validation) в пропорции 75%-15%-15% соответственно.

Количество обучающих данных «с учителем»  $N=1420$  примеров обучения. Количество нейронов в скрытом слое  $n=15$ , выбрано эмпирически, исходя из точности результатов расчёта. Количество слоёв нейронов  $m=2$ , не считая входной и выходной слой, подобрано автоматически, исходя из количества обучающих данных. Для обучения выделено 1000 эпох обучения, но алгоритм прерван досрочно на эпохе обучения 236 по результатам подбора  $w$  для минимизации значения градиента и минимальном значении среднеквадратической ошибки (СКО).

Результат обучения нейронной сети и его качество представлен на рисунках 2, 3, 4:

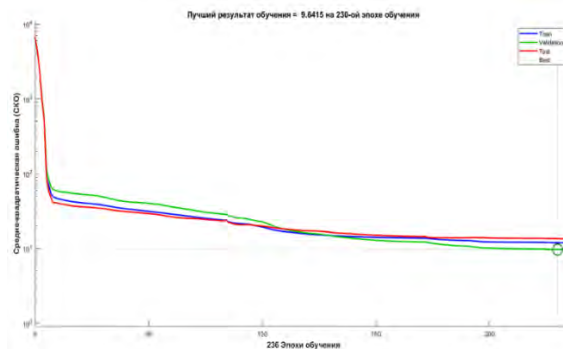


Рис. 2. График зависимости СКО от эпохи обучения НСПР при обучении с учителем.

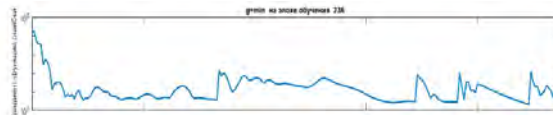


Рис. 3. График градиента функции ошибки  $\nabla G_n$ .

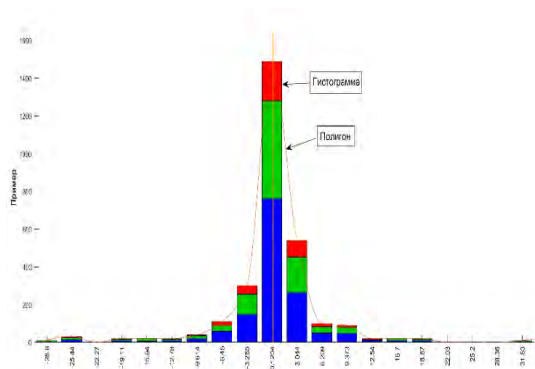


Рис. 4. Гистограмма распределения и полигон распределения ошибок функции  $e_i(w) = y_i(w) - \tilde{y}_i$   
 Матожидание градиента функции ошибки  $X_{e(w)} = 0,1204$

На рисунке 5 показано сравнение прогнозируемого нейронной сетью значения  $Q_{ME, pred}$ , линейно-прогнозируемого значения  $Q_n$  (по заявленным данным) и действительного значения  $Q_a$ , не вошедшего в обучающую выборку.

Результаты моделирования динамической системы показывают, что прогнозируемое значение на выходе существенно отличаются от заявленных характеристик даже с учётом того, что волнение в некоторых узлах составляет менее 4 баллов. Это касается как расхода топлива, так и фактической средней скорости судна за сутки  $V_a$ .

В таблице 2 где индекс «pred» - прогнозируемый параметр (prediction),  $\tilde{Y}_{pred} = sim(net, [X])$  - оператор симуляции процесса в нейронной сети, индекс «a» - действительный параметр (actual).

**5. Результат прогнозирования расхода топлива для океанской части перехода, S=3850 м. миль.**

Таблица 2

Результат расчёта расхода бункерного топлива на трансокеанском переходе

$\tilde{X}_{pred}$						$\tilde{Y}_a$			$\tilde{Y}_{pred}$		
RPM <sub>ME</sub>	L <sub>i</sub>	W <sub>wind</sub>	C <sub>s</sub>	W <sub>wave</sub>	T	S <sub>a</sub>	Q <sub>ME</sub>	V <sub>a</sub>	S <sub>pred</sub>	Q <sub>ME</sub>	V <sub>pred</sub>
80,4	56	4	-0,5	2,1	24	294	39,6	12,25	291,4923	38,8203	12,14551
80,4	56	4	-0,1	2,6	24	303	39,7	12,63	303,269	38,5162	12,63621
78,8	55	4	-0,1	2,6	24	297	37,9	12,38	295,9886	37,7827	12,33286
80,3	56	4	-0,2	2,3	24	296	40,4	12,33	297,5267	38,6464	12,39695
80,1	56	4	-0,2	2,2	24	293	40,4	12,21	297,4443	39,5627	12,39351
80,5	56	5	-0,5	2,4	24	281	40,3	11,71	279,3374	39,495	11,63906
79,9	56	4	-0,2	2,3	24	297	41,9	12,38	292,4209	42,553	12,1842
81,2	58	4	-1	2	24	279	40,2	11,63	280,4092	39,6273	11,68372
80,8	58	4	-1,1	1,4	24	281	40,9	11,71	277,3052	39,481	11,55438
82,3	59	4	-0,2	1,2	24	289	40,9	12,05	292,5344	38,8146	12,18893
76,4	54	5	-1	2,5	24	278	35,3	11,58	277,9372	37,5886	11,58072
82,3	58	3	-2,5	1	24	281	40,8	11,71	280,8281	38,9218	11,70117
82,6	58	3	0,3	1	24	335	42	13,96	327,0012	39,415	13,62505
77,8	56	4	-0,2	1,5	3,69	46	6,3	12,45	47,4165	5,79925	12,85093
<b>Σ</b>						3850	526,6	<b>V<sub>av</sub></b> =12,2	3840,91	515,023	<b>V<sub>av</sub></b> =12,1

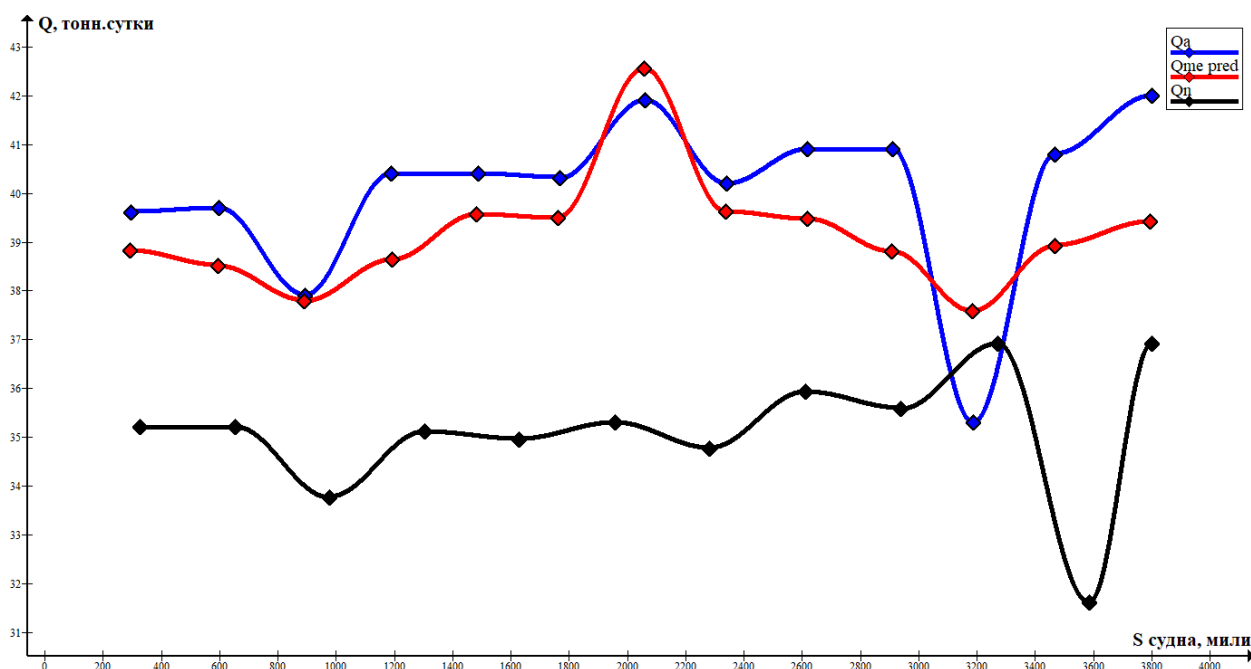


Рис. 5. График сравнения расходов,  $Q_a$ ,  $Q_{ME,pred}$ ,  $Q_n$ , в период океанского плавания.

### Заключение

Преимуществом данного метода является учёт нагрузки на главный двигатель Li, а также гидрометеорологических воздействий, относительно корпуса судна, что позволяет НСПР во время обучения определить правильную тенденцию их влияния на корпус судна.

Предложенный метод может позволить оператору алгоритма более точно прогнозировать возможность перерасхода бункерного топлива, а также предсказать невыполнение скорости даже при заявленных данных.

Ещё одним преимуществом метода является учёт специфических особенностей судна, и прогнозируемых скоростных приращений. Так как ряд параметров, которые трудно рассчитать, уже «закодирован» в значениях множества обучающей выборки. Среди таких параметров могут быть обводки корпуса судна, степень обрастание корпуса, зазубрины гребного винта, старение ГД и основных узлов, износ, влажность воздуха и т.д.

В дальнейших исследованиях можно рассмотреть применение «капсульных» и «сверхточных»

нейронных сетей, потому что они дают существенное преимущество в 30-50 % по сравнению с плоскими сетями в задачах распознавания образов и установления скрытых зависимостей [2,3]. В данной динамической системе для составления полного вектора гидрометеорологической обстановки можно использовать аппроксимированную графовую модель нахождения оптимального пути судна, что позволит получить значение взвешенного ребра. [4] К недостаткам метода следует отнести следующие моменты:

1. Сложности при составлении обучающей выборки. Это обусловлено «зашумлённостью» данных, которая возникает при некорректном внесении данных в «abstract log».
2. Относительно сложную систему расчёта, которая требует большой вычислительной мощности ЭВМ, а также подбор большого числа данных значений обучающей выборки, которые будут подходить для решения задачи.
3. Эмпирическое значение количества нейронов в скрытом слое N.

### Литература:

1. Пархоменко С.С. О сокращении времени обработки большого количества данных нейронными сетями методом Левенберга-Марквардта, Международный научно-исследовательский журнал. Под ред. А.В. Миллер. – 20. – ООО «Импекс», 2014. – Январь. – С. 80–83.
2. Хайкин С. Преимущества и ограничения обучения методом обратного распространения. Нейронные сети. – М. : Вильямс, 2006. – С. 304–314.
3. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. : пер с англ.- М :Издательский дом «Вильямс», 2006 – 1104 с. :ил.- Парал. Тит. Англ.
4. В. И Филатов. Современные подходы к оптимизации рейса морского судна. "Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова". 2017-№ 4. – Новороссийск, - с.31-38.
5. IMO. (2009). Second-IMO-GHG-Study-2009. Retrieved August 11, 2018, from <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Second-IMO-GHG-Study-2009.aspx>
6. K. Levenberg. "A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares". The Quarterly of Applied Mathematics, 2: 164-168 (1944).

7. Mark K. Transtrum and James P. Sethna "Improvements to the Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least-squares minimization," Preprint submitted to Journal of Computational Physics, January 30, 2012.
8. Shell voyage charter party. SHELLVOY6, London, p 24. : URL - [http://www.fleetle.com/a/d/pdf/shellvoy\\_6\\_ver\\_1\\_1.pdf](http://www.fleetle.com/a/d/pdf/shellvoy_6_ver_1_1.pdf)
9. Zhihui Hu , Yongxin Jin, Qinyou Hu, Sukanta Sen, Tianrui Zhou, and Mohd Tarmizi Osman. Prediction of Fuel Consumption for Enroute Ship Based on Machine Learning. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 200120, China.

#### References

1. Parhomenko S.S. O sokrashchenii vremeni obrabotki bol'shogo kolichestva dannyh neyronnymi setyami metodom Levenberga-Markvardtaю Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal . Pod red. A.V. Miller. – 20. – ООО «Impeks», 2014. – YAnvar'. – S. 80–83
2. Hajkin S. Preimushchestva i ogranicheniya obucheniya metodom obratnogo rasprostraneniya. Neironnye seti. – M. : Vil'yams, 2006. – S. 304–314.
3. Hajkin S. Neironnye seti: polnyj kurs, 2-e izdanie. : per s angl.- M. : Izdatel'skij dom «Vil'yams», 2006 – 1104 s. :il.- Paral. Tit. Angl.
4. V. I Filatov. Sovremennye podhody k optimizacii rejsa morskogo sudna. "Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F. F. Ushakova". 2017-№ 4. – Novorossiysk, - s.31-38.
5. G IMO. (2009). Second-IMO-GHG-Study-2009. Retrieved August 11, 2018, from <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Second-IMO-GHG-Study-2009.aspx>
6. D K. Levenberg. "A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares". The Quarterly of Applied Mathematics, 2: 164-168 (1944).
7. Mark K. Transtrum and James P. Sethna "Improvements to the Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least-squares minimization," Preprint submitted to Journal of Computational Physics, January 30, 2012.
8. G Shell voyage charter party. SHELLVOY6, London, p 24. : URL - [http://www.fleetle.com/a/d/pdf/shellvoy\\_6\\_ver\\_1\\_1.pdf](http://www.fleetle.com/a/d/pdf/shellvoy_6_ver_1_1.pdf)
9. Zhihui Hu , Yongxin Jin, Qinyou Hu, Sukanta Sen, Tianrui Zhou, and Mohd Tarmizi Osman. Prediction of Fuel Consumption for Enroute Ship Based on Machine Learning. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 200120, China.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Филатов Виктор Иванович**, преподаватель, аспирант кафедры «Судовождение», Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 353918, Новороссийск, пр. Ленина, 93  
e-mail: [filatov\\_viktor1994@mail.ru](mailto:filatov_viktor1994@mail.ru)

**Victor I. Filatov**, Lecturer, Graduate Student of the Navigation Department, of Admiral Ushakov Maritime State University, 353918, Novorossiysk, pr. Lenin, 93  
e-mail: [filatov\\_viktor1994@mail.ru](mailto:filatov_viktor1994@mail.ru)



УДК 656.615

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.014

## Определение простоев судов при обработке на рейдовых причалах

Ю.В. Горгуца<sup>1</sup><sup>1</sup>YugMorStroy – T

**Аннотация.** Строительство рейдовых причалов получило большое развитие в настоящее время. Действующие нормы технологического проектирования морских портов не предлагают решений для открытых акваторий, не защищённых от волнения. В предыдущих работах автора доказана правильность представления потока метеопомех обработке судов простейшим потоком, а длительность действия метеопомех показательным распределением. В данной статье приводятся обоснования характера распределения вероятностей судоподходов и времени обработки судов на рейдовых причалах. С учётом специфики функционирования рейдовых причалов при обработке судов предлагается использовать для расчёта их технологических параметров аппарат теории массового обслуживания (ТМО) для систем массового обслуживания (СМО) с приоритетом, позволяющий адекватно описывать их работу и получать достоверные результаты. Сравнение теоретических расчётов простоев судов по метеофакторам с практическими данными показало высокую сходимость результатов.

**Ключевые слова:** Рейдовые причалы, судоподходы, обработка судов, простои из-за метеопомех, распределение вероятностей, теория массового обслуживания, приоритеты.

## Identifying demurrage in processing of vessels on offshore terminals

Yuliy V. Gorgutsa<sup>1</sup><sup>1</sup>YugMorStroy-T

**Annotation.** Offshore terminals building has a huge development nowadays. Existing norms of sea ports technological design do not offer solutions for high seas, unprotected from sea swells. It has been proved in author's previous works that meteorological obstacles flow can be presented as the simplest flow, and meteorological obstacles as exemplary distribution. This article presents justification for character of probability distribution of ships entering and time of ships processing on offshore terminals. Taking into account the specifics of offshore terminals functioning while processing ships, it is proposed to use the apparatus of queueing theory (QT) for public service systems (PSS) for calculating their technological parameters with priority, allowing to describe their work adequately and achieve reliable results. It includes a comparison of theoretical calculations.

**Key words:** Offshore terminals, processing of vessels, demurrage caused by meteorological obstacles, probability distribution, queueing theory, priorities.

### Введение

Успешная эксплуатация рейдовых причалов нефтегазавани Шехарис и Каспийского Трубопроводного Консорциума (КТК) в Новороссийском порту послужила толчком к проектированию и строительству целого ряда специализированных рейдовых причалов как на юге – порт Тамань, так и на Дальнем севере, и на Дальнем востоке. Естественно, что главной особенностью работы на рейдовых причалах является гораздо большее воздействие на обработку судов помех от метеофакторов, чем на обычных, работающих в защищённых акваториях. Учёт помех по метеофакторам простым исключением времени штормов из эксплуатационного периода - СП 350.1326000. 2018 [1], Приложение Г, формула Г6 практически игнорирует неравномерность подхода судов, их скопление после длительных штормов, а также и возможные периоды действия штормов при отсутствии судов. Разработанная автором Методика определения параметров помех по метеофакторам обработке судов в морских портах [2, 3] позволила доказать правильность представления потока метеопомех простейшим потоком, а длительность их действия показательным распределением. В данной статье приводятся обоснования характера распределения судоподходов и распределения времени обработки судов на рейдовых причалах. В дальнейшем, на основе полученных результатов и специфики функционирования рейдовых причалов

при обработке судов предлагаются системы массового обслуживания (СМО), позволяющие адекватно описывать их работу и получать достоверные результаты при расчёте их технологических параметров.

### 1. Определение характера распределения судозаходов

При решении задач морского транспорта с помощью теории массового обслуживания многие исследователи принимали распределение судозаходов в порт пуассоновским. Однако данные о детальной проверке соответствия теоретических значений практически в отечественных публикациях отсутствуют. Учитывая возросший уровень регулирования движения судов эксплуатационными службами, который мог повлиять на характер распределения судозаходов, было предпринято дальнейшее исследование этого вопроса на базе данных Новороссийского морского порта.

Путём выборки из таймшитов по всем районам порта был получен простой статистический ряд, представляющий собой даты в хронологической последовательности и суда, пришедшие в порт за каждый день года. Затем были выполнены подсчёты по количеству случаев с различным числом судозаходов в день, начиная от 0. Упорядоченные результаты представлены в первых двух графах табл. 1, где  $X_i$  - число судозаходов в сутки,  $m_i$  -

количество случаев в статистической выборке с числом судозаходов  $X_i$ .

Общее количество судозаходов за год составило 748 судов. Среднее арифметическое судозаходов  $X$  равно

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i m_i}{n} = 2,03$$

где  $n=366$  число дней в год исследований. Определяем выборочную оценку дисперсии

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (X_i - X)^2}{n-1} = 2,10$$

1	$X_i$	0	1	2	3	4	5	6	7
2	$m_i$	49	104	106	70	24	14	7	2
3	$P_i$	0,131	0,267	0,271	0,183	0,093	0,038	0,013	0,004
4	$nP_i$	47,8	96,6	98,7	67,7	33,9	13,8	4,7	1,5
5	$(m_i - nP_i)$	1,4	54,8	53,2	5,3	98,0	0,0	5,3	5,3
6	$\chi^2$	0,03	0,57	0,54	0,08	2,88	0,00	1,13	0,20

Таблица 1

Таким образом проверка статистических данных по Новороссийскому порту подтверждает правдоподобность гипотезы о пуассоновском распределении судозаходов в порт.

Кроме того, учитывая необходимость применения разрабатываемой методики для изолированных одиночных причалов, был детально исследован вопрос распределения вероятностей судоподходов для этого случая. Глубоководный причал №1 нефтегавани Шехарис Новороссийского порта позволяет обрабатывать танкера дедвейтом 75 тыс. тонн и выше. Суда указанных измерений не могут обрабатываться на других причалах нефтегавани из-за их мелководности. Одновременно суда, обрабатываемые на других причалах нефтегавани, не могут обрабатываться на глубоководном причале из-за несоответствия высотных отметок судов, высотным отметкам этого причала. Всё вышесказанное позволило сделать вывод, что поток судов, обрабатываемых на глубоководном причале, является изолированным потоком.

Путём выборки из таймшитов нефтегавани был получен хронологический ряд подходов судов, обрабатываемых на глубоководном причале. Затем были выполнены расчёты, аналогичные описанным выше, для определения закона распределения вероятностей судозаходов в целом в порт. Общее количество судов, обработанных на причале, составило 154 судна. Среднее арифметическое судоподходов равнялось

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i m_i}{n} = 0,422;$$

Необходимое условие для распределения Пуассона  $X=S$  практически выполняется. При параметре Пуассона равным  $X$ , по таблицам (4) путём интерполяции были найдены теоретические значения вероятностей судозаходов  $P_i$ . Результаты представлены в строке 3 табл. 2. Проверку правдоподобности о пуассоновском распределении судозаходов в порт ведём по критерию согласия  $\chi^2$  в табл. 1.

Путём суммирования данных по строке 6 было найдено  $\chi = 5,43$ . Для  $r = 6$  по табл. (4)  $P = 0,5$ , что говорит о высокой сходимости статистического и теоретического распределений.

Выборочная оценка дисперсии

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n m_i (X_i - X)^2}{n-1} = 0,393$$

Необходимое условие для распределения Пуассона  $X=S$  выполнялось. Критерий равнялся

$$\chi = \sum_{i=1}^n \frac{2 | m_i - n P_i |}{n P_i} = 1,258$$

Все вычисления представлены в табл. 2

$X_i$	0	1	2	3
$M_i$	236	106	21	2
$P_i$	0,670	0,269	0,054	0,008
$n P_i$	244	98,2	19,7	2,92
$(m_i - n P_i)$	8,00	7,80	1,30	0,92
$\chi^2$	0,262	0,620	0,086	0,290

Таблица 2

Число «степеней свободы» было найдено по формуле

$$r = K - S = 2$$

По табл. [4] определено, что вероятность превышения величиной, распределённой по закону  $\chi$ , найденного значения, равняется  $P = 0,54$ , т.е. больше необходимого значения равного 0,1. Это позволяет сделать вывод о правдоподобности гипотезы о пуассоновском распределении потока судоподходов и в случае изолированных одиночных нефтеналивных причалов. Графики теоретических и статистических распределений для обоих описанных случаев представлены на рис.1 и 2.

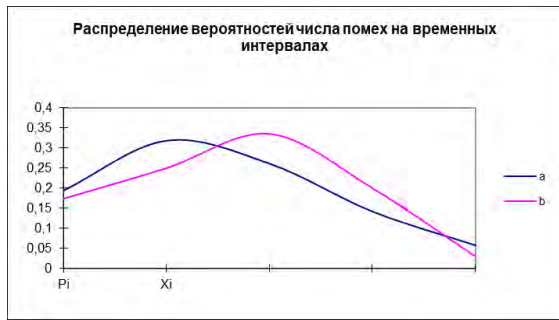


Рис. 1

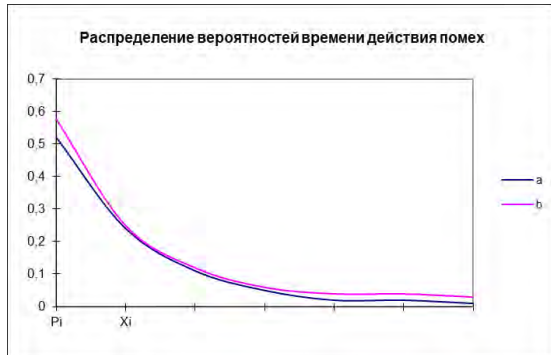


Рис. 2

Проверка распределения вероятностей судоподходов по описанной выше методике была выполнена и на причалах Каспийского трубопроводного консорциума, путём обработки данных за 2 года - рис.3, 4. Она подтвердила высокую достоверность аппроксимации судоподходов законом Пуассона.

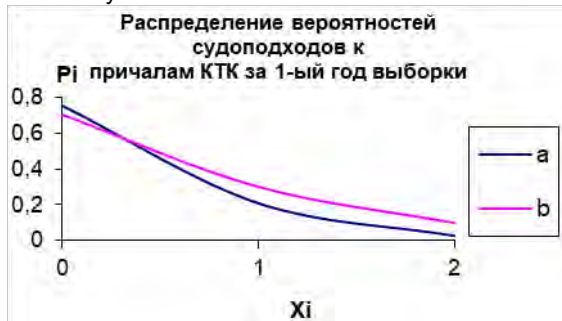


Рис. 3

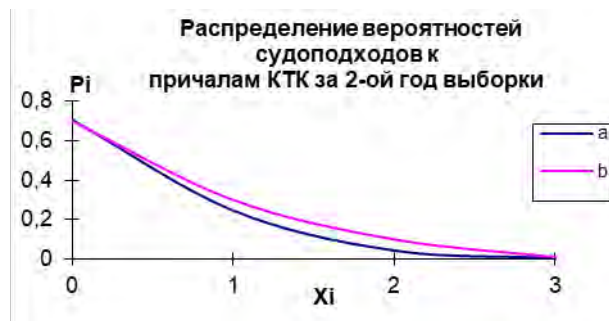


Рис. 4

## 2. Обоснование характера распределения времени обработки судов на рейдовых причалах

Исследование характера распределения вероятностей времени обработки судов на рейдовых причалах было проведено на основе отчётных данных нефтегавани Шесхарис по обработке 156 судов на глубоководном причале за календарный год. Аппроксимация времени обработки судов показательным распределением, а также нормированными кривыми Эрланга 1-го и 2-го порядка и проверка сходимости статистических и теоретических кривых распределения по критериям согласия показали, что ни один из указанных законов распределения не сходится достаточно точно со статистической кривой. Расчёты кривых представлены в табл. 3, а графики кривых на рис. 5. Как видно из графиков наиболее близка к статистической кривая показательного распределения. Анализ ряда работ советских и зарубежных авторов показывает, что в основном предлагается аппроксимировать распределение вероятностей времени обработки показательным законом и нормированными законами Эрланга. Причём при работе на специализированных причалах большинство авторов склоняется к показательному закону, а при работе на причалах общего назначения к распределениям Эрланга. Из теории массового обслуживания [5] известно, что пропускная способность и другие характеристики систем массового обслуживания сравнительно мало зависят от вида закона распределения времени обслуживания, а зависят, главным образом, от его среднего значения. Исследования, проведённые Гнеденко Б.В. и Зубковым М.И. [6] при математическом моделировании работы порта показали, что разница между конечным результатом при равномерном, нормальном и гамма-распределением времени обслуживания не превышает 5%. Это же подтверждается и работой Турлай И.В. [7] которая на базе сравнения расчётов, произведённых для моделей с Эрланговским распределением и показательным, утверждает, что расхождение на практических результатах не сказывается. Это позволяет сделать вывод, что аппроксимация распределения вероятностей времени обработки судов показательным распределением наиболее рациональна.

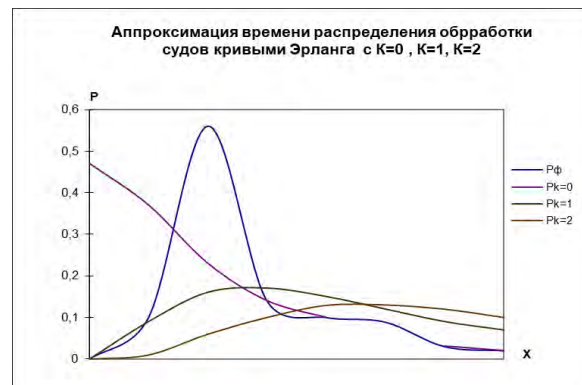


Рис. 5

Таблица 3

№ п/п	$x_i - x_{i+1}$	X	$m_i$	$\frac{X}{X}$	$\frac{1}{l} \cdot \frac{x}{x}$	$\frac{1}{x} \cdot \frac{x}{x}$	$\frac{1}{x} \cdot \frac{x}{x} \cdot \frac{x}{x}$	$\left(\frac{x}{x}\right)^2 \cdot \frac{1}{2}$	$\frac{1}{x} \cdot \frac{x}{x} \cdot \left(\frac{x}{x}\right) \cdot \frac{1}{2}$	Pk=0	Pk=1	Pk=2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0-1	0,5	15	0,236	0,790	0,372	0,088	0,028	0,010	58,0	13,7	1,56
2	1-2	1,5	88	0,708	0,493	0,232	0,164	0,251	0,058	36,2	25,6	9,05
3	2-3	2,5	22	1,18	0,307	0,145	0,171	0,696	0,101	22,6	26,7	15,8
4	3-4	3,5	15	1,65	0,192	0,090	0,148	1,36	0,122	14,0	23,1	19,0
5	4-5	4,5	8	2,12	0,120	0,056	0,119	2,25	1,126	8,7	18,6	19,7
6	5-6	5,5	5	2,59	0,075	0,035	0,091	3,35	1,118	5,5	14,2	18,4
7	6-7	6,5	3	3,07	0,046	0,022	0,068	4,17	0,102	3,4	10,6	15,9

**3. Расчёт простоев судов при обработке на рейдовых причалах**

Описанные выше натурные и теоретические исследования показывают, что при функционировании рейдового причала взаимодействуют два потока случайных событий - поток судов и поток помех обработке судов по метеофакторам. Эти потоки являются простейшими. Время обработки судов у причалов и время действия помех обработке судов по метеофакторам распределены по показательному закону. При приходе помехи (шторма) обработка судов прекращается и возобновляется только после окончания её действия. Наиболее адекватно этот процесс описывается математическими моделями систем массового обслуживания (СМО) с приоритетом. Решения для таких систем приведены Н. Джейсуолом [8]. Приоритетной дисциплиной называется дисциплина, согласно которой прибор выбирает следующие требования для обслуживания. Функционирование рейдовых причалов в условиях значительного воздействия потока помех по метеофакторам обработке судов наиболее адекватно описывается моделью с абсолютным приоритетом с дообслуживанием. Приоритетными являются метеопомехи, а неприоритетными - суда. Согласно [8], при показательном распределении времени обслуживания приоритетных и неприоритетных требований для установившегося режима обслуживания средняя длина очереди неприоритетных требований может быть получена по формуле

$$MS_2 = \frac{\lambda_2 \lambda_1 E(S_1) + \lambda_2 E(S_2)}{2(1 - \rho_1)(1 - \rho_1 - \rho_2)}$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  - нагрузки системы приоритетными и неприоритетными требованиями;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  - интенсивности потоков приоритетных и неприоритетных требований;  $E(S_1)$  и  $E(S_2)$  - вторые моменты функции распределения времени обслуживания приоритетных и неприоритетных требований.

Отдельно был рассмотрен тот факт, что согласно принятой для описания функционирования рейдовых причалов модели систем массового обслуживания, помехи при их приходе во время действия ранее пришедших помех должны становиться в очередь и

ожидать окончания действия предыдущей (то - есть в символике систем массового обслуживания требование, пришедшее при занятом канале, должно ожидать окончания обслуживания предыдущего). Этот факт, с одной стороны, соответствует сделанному во второй главе выводу о том, что реальный поток помех при обработке судов на рейдовых нефтепричалах представляет собой сумму потоков помех, возникающих по различным не зависимым причинам, с другой стороны, говорит о том, что в отдельных случаях, согласно принятой математической модели, должна возникать очередь помех, которая в реальной практике не существует. Помехи в отличие от требований или заявок не ожидают окончания действия предыдущей помехи, а сразу же по приходу воздействует на причал накладываясь на предыдущую. Для получения правильного результата с использованием применяемой математической модели необходимо ввести поправку, уменьшив суммарную продолжительность действия помех за эксплуатационный период на величину суммарного времени ожидания помех в очереди, практически не существующей.

Среднее время действия помех с учетом правки будет равно

$$V_n = V_n - \frac{\lambda_n V_n^2}{1 - \lambda_n V_n}$$

Сравнение расчетов простоев судов и критериев оптимальности загрузки одного из причалов, выполненных с введением поправки и без неё, показывает, что её значение для конечных результатов незначительно. Графики, выполненные по материалам этих расчетов, представлены на рис.6.

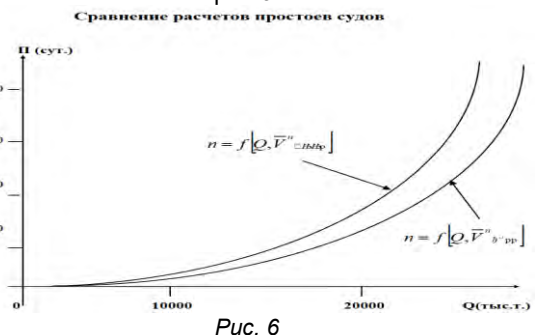


Рис. 6



Формула для определения средней очереди судов на рейдовых причалах будет иметь вид

$$M_c = \frac{\lambda_c \lambda_n V_n^2 + \lambda_c^2 V_c^2}{(I - \lambda_n V_n)(I - \lambda_n V_n - \lambda_c V_c)}$$

Время простоев судов находится по формуле

$$T_{ср} = T_{э} \cdot M_c$$

Сравнение теоретических расчетов простоев судов по метеофакторам с практическими по отчётным данным нефтегавани Шесхарис показало высокую сходимость результатов.

#### Заключение

1. Натурные и теоретические исследования характера распределения вероятностей судозаходов и времени обработки судов в Новороссийском порту показали, что поток судозаходов описывается пуассоновским распределением, а время обработки судов показательным распределением.

2. Полученные результаты позволили применить для решения задач по определению простоев судов из-за метеофакторов математический аппарат теории массового обслуживания для СМО с приоритетами.

3. Наиболее адекватно функционирование рейдовых причалов описывается СМО с абсолютным приоритетом с дообслуживанием.

4. Полученные формулы расчёта времени простоев судов из-за метеопомех дают достаточно точные результаты, подтверждённые сравнением расчётных простоев с фактическими.

5. Дальнейшие исследования должны быть направлены на получение СМО с несколькими причалами и произвольным распределением вероятностей времени обслуживания судов и действия помех.

#### Литература

1. Нормы технологического проектирования морских портов, СП 350.1326000. 2018.
2. Горгуца Ю.В. Новые методы принятия решений при проектировании и эксплуатации морских портов. – М. МГУ, изд. МАКС Пресс. 2001 г.
3. Горгуца Ю.В. Методика определения параметров помех по метеофакторам обработке судов в морских портах. – С. П-г, МИТ № 1 (37) Т. 1 2020.
4. Абезгауз Г.Г. и др. Справочник по вероятностным расчётам. Изд. 2-е, М. Воениздат, 1970.
5. Владимиров В. Матвеев В.Ф. Системы обслуживания с преимуществом и «разогревом», в сб. «Вычислительные методы и программирования», 1967, №6, ВЦ МГУ.
6. Гнеденко Б.В. Зубков М.И. Об определении оптимального числа причалов. - Морской сборник. №6, 1964.
7. Турлай И.В. Математические модели обслуживания судов в Лесном порту. - Известия. В 43 св, вып.№9, 1980.
8. Джейсуол Н. Очереди с приоритетом. - М., Мир, 1977.

#### References

1. Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov [Sea ports technological design standards] SP 350.1326000. 2018.
2. Gorgutsa Yu.V. Noveye metody prinyatiya resheniy pri proektirovanii i ekspluatatsii morskikh portov [New methods of decision making in sea port design and operation] – M. MGU, izd. MAKS Press. 2001 g.
3. Gorgutsa Yu.V. Metodika opredeleniya parametrov pomekh po meteofaktoram obrabotke sudov v morskikh portakh [Methodology for measuring weather interference parameters in vessel processing in sea ports]. – S. P-g, MIT № 1 (36) T. 1 2020.
4. Abezgauz G.G. i dr. Spravochnik po veroyatnostnym raschetam [Guide to probabilistic calculations]. Izd. 2-e, M. Voenizdat, 1970.
5. Vladimirov V. Matveev V.F. Sistemy obsluzhivaniya s preimushchestvom i «razogrevom» [Service systems with advantage and "warm-up"] v sb. «Vychislitel'nye metody i programmirovaniya» 1967, №6, VTs MGU.
6. Gnedenko B.V. Zubkov M.I. Ob opredelenii optimal'nogo chisla prichalov [On determining the optimal number of docks] - Morskoy sbornik. №6, 1964.
7. Turlyay I.V. Matematicheskie modeli obsluzhivaniya sudov v Lesnom portu [Mathematical models of vehicles processing in Lesnoy port] - Izvestiya. V 43 sv, vyp. №9, 1980.
8. Dzheysuol N. Ocheredi s prioritetom [Priority queue]. - M., Mir, 1977.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Юлий Васильевич Горгуца**, кандидат технических наук. Генеральный директор ООО «ЮгМорСтрой – Т», 353920, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Дзержинского 183, e-mail: yugor@inbox.ru

**Yuliy V. Gorgutsa**, Ph.D. (Eng), CEO of “YugMorStroy-T” LLC, 353920, Krasnodarskiy Krai, Novorossiysk, pr. Dzerzhinsky 183, e-mail: yugor@inbox.ru

УДК 656.615  
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.044

## Модели, описывающие обработку судов на рейдовых причалах

Ю.В. Горгуца<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ЮгМорСтрой – Т

**Аннотация.** При проектировании рейдовых причалов, строительство которых получило широкое развитие в настоящее время, невозможно воспользоваться методами, предлагаемыми ныне действующими Нормами технологического проектирования, так как они были выполнены для традиционных защищённых акваторий и опираются на статистический материал, полученный по существующим портам. Для разработки методов определения простоев судов при обработке судов на рейдовых причалах с учётом потока помех от метеофакторов (штормов) как потока случайных событий в данной статье описывается исследование новых моделей систем массового обслуживания. Используется метод суперпозиций – находятся решения для простых моделей, которые затем используются для получения решений по более сложным моделям. Первоначально рассматривается простейшая модель, состоящая из потоков вызовов (штормов) и прибора (порта). Поток вызовов – пуассоновский. Время обслуживания – произвольное с преобразованием Лапласа-Стилтьеса. Полученные результаты используются для исследования модели с потоками помех от ветров двух различных направлений. Далее исследуется однолинейная модель с «ненадёжным» прибором. Входящий поток – пуассоновский поток подходящих к порту судов. Время обслуживания – длительность интервалов времени между освобождением места у причала для судна, ожидающих на рейде. Выход из строя прибора, как в свободном, так и в занятом обслуживанием состоянии определяется наступлением шторма – событием пуассоновского потока с интервалами между событиями – интервалами между наступлением штормов. Длительность восстановления работоспособности прибора – определяемая в первой модели длительность простоя причала из-за воздействия метеофакторов. Суда, оказавшиеся в порту при наступлении шторма «дообслуживаются» после его окончания. Итоговая модель – многоканальная с параллельно работающими приборами (причалам) и экспоненциальное временем обслуживания судов. Полученные результаты сравнивались со статистическими и показали их высокую сходимость, что доказывает их достоверность.

**Ключевые слова:** рейдовый причал, простои судов, пуассоновский поток, метеофакторы, однолинейная модель, время обслуживания.

## Models, describing vehicles processing on offshore terminals

Yuliy V. Gorgutsa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>YugMorStroy-T

**Annotation.** While designing offshore terminals, which are being built quite widely in recent time, it is impossible to use methods, proposed by current technological design norms, because they were created for traditional protected waters and are based on statistical data, acquired by existing ports. This article describes the research of new models of mass service systems to develop methods of defining demurrage while processing vehicles on offshore terminals, taking into account disturbance flow from weather factors (storms) as flow of random events. Method of superpositions is used - to find solutions for simple models, which are used afterwards for getting solutions for more complicated models. Initially the basic model is reviewed, consisting of flow of challenges (storms) and device (port). Challenges flow is Poisson. Service time - arbitrary with transformation of Laplace-Stieltjes. Results acquired are used for researching the model with disturbance flows from windows of various directions. Next the unilineal model with "unreliable" device is researched. Incoming flow is Poisson flow of incoming vehicles. Service time - length of time intervals between berths exemption for vehicles awaiting on raid. Device failure, both in free and in maintenance mode was defined by storm incoming - the event of Poisson flow with intervals between events - intervals between storms. Duration of device efficiency recovery - is defined in the first model duration of terminal demurrage due to weather influence. Vessels, caught up in the port during storm will be maintained after its end. Final model is multi-channel one with working devices (terminals) and exponential time of vessel service. Acquired results have been compared with statistical data, which showed they high convergence, proving their reliability.

**Key words:** offshore terminal, demurrage, Poisson flow, meteorological factors, unilineal model, service time.

### Введение

Проведенные автором натурные и теоретические исследования показали, что при функционировании рейдовых причалов взаимодействуют два потока случайных событий - поток судов и поток помех обработке судов по метеофакторам. Эти потоки являются простейшими. Время обработки судов у причалов и время действия помех обработке судов по метеофакторам распределены по показательному закону. При приходе помехи обработка судов прекращается и возобновляется только после окончания её действия. Достоверные результаты при

расчете простоев судов удалось получить, используя формулу Н. Джейсуола для однолинейных систем массового обслуживания (СМО) с абсолютным приоритетом с дообслуживанием, с введением поправки на длину действия помех обработке судов по метеофакторам. Для получения моделей полностью адекватных реальному процессу, а также для расчета простоев судов от метеофакторов при их обработке на нескольких взаимозаменяемых причалах разработаны новые модели, которые описываются в настоящей работе.

## 1. Выбор характеристик и параметров и определение их значений

В качестве *основных характеристик* были приняты следующие:

- количество судов, находящихся в порту, включая суда на рейде,
- время пребывания в порту пришедшими судами, включая пребывание на рейде и у причала при обработке, с учётом простоев из-за воздействия метеопомех (штормов).

Нас интересовали оценки для соответствующих характеристик. В построенных ниже моделях эти характеристики представлены в виде неотрицательных случайных величин. Такие величины полностью задаются своими вероятностными распределениями или их преобразованиями Лапласа-Стилтьеса. С практической точки зрения важно оценить среднее значение этих величин, а также величину погрешности оценки (дисперсию, среднеквадратичное отклонение от среднего значения).

В качестве *основных параметров* принимаются следующие:

- интервалы времени между приходом судов на рейд порта,
- время обработки судов,
- интервалы времени между наступлениями штормов (метеопомех),
- продолжительность времени действия шторма.

Значения параметров определялись следующим образом.

1.Потоки судов моделируются стохастическими пуассоновскими потоками. Содержательный смысл такого параметра – среднее количество судов, поступающих за выбранный единичный интервал времени. Значения этого параметра различны для разных портов, и зависят от степени интенсивности эксплуатации порта. Практически, значение этого параметра определяется на основании статистических замеров, как среднее арифметическое из зафиксированных наблюдений о количестве судов, поступающих на рейд порта за выбранный единичный интервал времени при соответствующих условиях.

2.Время обработки судов будем описывать длительностью интервалов времени между освобождением места у какого-нибудь причала порта для судна, ожидающего на рейде, при фиксированных условиях функционирования порта. Длительность таких интервалов определяется многими факторами. Для нашего исследования мы принимаем эти интервалы, как реализации некоторой неотрицательной случайной величины. Для оценок интересующих нас характеристик нам потребуются значения первых трех моментов распределения этой случайной величины. Эти значения определяются также на основе статистической обработки информации о функционировании порта. Первый параметр – это среднее время освобождения мест у причалов порта. Он вычисляется, как среднее арифметическое из зафиксированных наблюдений о времени освобождения мест у причалов порта при соответствующих условиях. Второй и третий параметры – среднее значение квадрата и, соответственно, куба времени освобождения мест у причалов порта. Они так же оцениваются, как среднее арифметическое из квадратов и кубов тех же значений. В случае если длительность обслуживания судна у каждого причала

можно считать экспоненциальной (показательной) случайной величиной с известными параметрами распределения, то распределение вероятностей введённых нами интервалов будет показательным распределением с параметром равным сумме параметров распределений, соответствующих загруженным причалам.

3.Последовательные моменты времени наступления помех по метеофакторам (штормов), приводящих к прекращению обслуживания судов, можно оценивать, как моменты наступления событий пуассоновского потока с параметром, соответствующим конкретной ситуации. Параметр пуассоновского потока также оценивается статистическими методами на основе метеонаблюдений соответствующих служб.

4.Время длительности метеопомех определяется также статистически. Для нашего исследования мы принимаем этот временной интервал  $t$ , как произвольную неотрицательную случайную величину. Для оценок интересующих нас характеристик нам потребуются значения первых двух-трёх моментов распределения этой случайной величины. Эти значения определяются также на основе статистической обработки информации метеослужб. В ряде случаев, особенно в осенне-зимних условиях, до затухания шторма может поступить следующий циклон, который продлевает действие метеопомех. Таким образом, их длительность не определяется временем прохождения в районе порта отдельных воздушных потоков. Ниже будет построена модель наложения штормовых потоков, которая позволяет оценивать реальное распределение длительности метеопомех.

## 2. Разработка моделей, имитирующих работу рейдовых причалов по обработке судов с учётом их простоев из-за метеопомех

### 2.1. Исследование модели А1

Для решения задачи в целом будем использовать метод суперпозиций – находят решения для простых моделей, затем эти решения используются при получении решений для усложняющихся моделей. Сначала была рассмотрена чисто штормовая модель - модель **А1**, как однолинейная СМО с абсолютным приоритетом - рис 1.

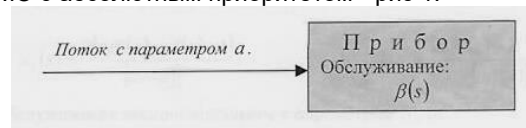


Рис. 1

В этой модели входящий поток «требуемых» – поток моментов прекращения обработки судов в порту из-за метеопомех, - пуассоновский поток. В качестве времени «обслуживания» «требуемых» рассматривается длительность затухания возмущения, вызванного начавшимся штормом, в нашем случае это фиксированная случайная неотрицательная величина с произвольным законом распределения.

Для обоснования приводимых ниже соотношений используется метод вероятностной интерпретации значений преобразований Лапласа-Стилтьеса неотрицательной случайной величины, как вероятности следующего события: за время реализации этой случайной величины шторм не наступил - событие некоторого независимого

пуассоновского потока с параметром – параметром преобразования Лапласа-Стилтьеса.

Тогда преобразование Лапласа-Стилтьеса продолжительности периода занятости системы  $\pi(s)$  есть вероятность того, что за период занятости шторм не произойдет.

Будем период занятости связывать с тем вызовом, с поступлением которого начинается сам период занятости. Тогда, чтобы за период занятости, связанный с некоторым вызовом не произошел шторм (вероятность чего есть  $\pi(s)$ ), необходимо и достаточно, чтобы (по формуле полной вероятности) либо за время обслуживания этого вызова не поступил поток штормов и поток вызовов, либо произошло противоположное событие, причем первым поступил вызов, (вероятность чего есть  $\frac{a}{a+s}$ ), и начался период занятости, связанный с поступившим вызовом.

$$\pi(s) = \beta(a+s) + [1 - \beta(a+s)] \frac{a}{a+s} \pi(s).$$

Таким образом, получена формула, из которой определяется преобразование Лапласа-Стилтьеса для периода занятости:

$$\pi(s) = \frac{(a+s)\beta(a+s)}{s+a\beta(a+s)}.$$

Средняя продолжительность периода занятости равна:

$$E\pi = \pi_1 = \frac{1 - \beta(a)}{a\beta(a)}.$$

Второй момент и дисперсия равны, соответственно:

$$\pi_2(s) = \frac{2[a\beta'(a) - \beta(a) + 1]}{[a\beta(a)]^2},$$

$$D\pi = \frac{2a\beta'(a) - \beta^2(a) + 1}{[a\beta(a)]^2}.$$

Если время обслуживания экспоненциальное с параметром  $b$ , то

$$\pi(s) = \beta(s) = \frac{b}{b+s} \quad \text{и} \quad E\pi = E\beta = \frac{1}{b},$$

$$D\pi = D\beta = \frac{1}{b^2}.$$

### 2.2 Исследование модели A2

В случае наличия нескольких видов воздушных потоков, вызывающих шторм, например, с условно «южного» направления и «северо-восточного», с разными параметрами, предлагается модель **A2** – СМО с двумя входящими пуассоновскими потоками и различными временами обслуживания для каждого потока – рис 2.

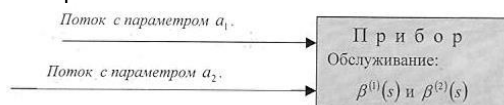


Рис. 2

Предполагается, что один из потоков более грозный, и он представлен как обладающий абсолютным приоритетом. Если во время сильного шторма приходит слабый, то он никак не влияет на продолжительность первого. Однако если во время слабого шторма приходит сильный, то сильный шторм поглощает слабый. Оба потока пуассоновские с параметрами  $a_1$  и  $a_2$ . Время обслуживания на приборе произвольное с преобразованием Лапласа-Стилтьеса  $\beta^{(1)}(s)$  для вызовов первого потока и  $\beta^{(2)}(s)$  для вызовов второго потока. Найдем для этой системы преобразование Лапласа-Стилтьеса для периодов занятости первого и второго потоков ( $\pi^{(1)}(s)$  и  $\pi^{(2)}(s)$ ) и для общего периода занятости  $\pi(s)$ .

Аналогично исследованию модели **A1** получаются следующие соотношения.

$$\pi^{(1)}(s) = \beta^{(1)}(s+a_1) + [1 - \beta^{(1)}(s+a_1)] \frac{a_1}{a_1+s} \pi^{(1)}(s)$$

$$\pi^{(2)}(s) = \beta^{(2)}(s+a_1+a_2) + [1 - \beta^{(2)}(s+a_1+a_2)] \left[ \frac{a_2}{a_1+a_2+s} \pi^{(2)}(s) + \frac{a_1}{a_1+a_2+s} \pi^{(1)}(s) \right].$$

Откуда получим:

$$\pi^{(1)}(s) = \frac{(a_1+s)\beta^{(1)}(a_1+s)}{s+a_1\beta^{(1)}(a_1+s)};$$

$$\pi^{(2)}(s) = \frac{a_1 a_2 \beta^{(1)}(a_1+s) \beta^{(2)}(a_1+a_2+s) + a_1(a_1+s)\beta^{(1)}(a_1+s) + (a_1+a_2+s)\beta^{(2)}(a_1+a_2+s)}{[a_1+s+a_2\beta^{(2)}(a_1+a_2+s)][s+a_1\beta^{(1)}(a_1+s)]}.$$

Отсюда первые и вторые моменты периодов занятости обоих потоков равны:

$$\pi_1^{(1)} = \frac{1 - \beta^{(1)}(a_1)}{a_1\beta^{(1)}(a_1)}; \quad \pi_2^{(1)} = \frac{2 \left[ a_1 (\beta^{(1)}(a_1))' - \beta^{(1)}(a_1) + 1 \right]}{[a_1\beta^{(1)}(a_1)]^2};$$

$$\pi_1^{(2)} = \frac{1 - \beta^{(2)}(a_1+a_2)}{\beta^{(1)}(a_1)(a_1+a_2\beta^{(2)}(a_1+a_2))};$$

$$\pi_2^{(2)} = \left\{ [1 - \beta^{(2)}(a_1+a_2)] \left[ a_1(\beta^{(1)}(a_1))' (a_2\beta^{(2)}(a_1+a_2)+a_1) + a_1+a_2\beta^{(2)}(a_1+a_2) (1 - \beta^{(1)}(a_1)) \right] + a_1^2(a_1+a_2)\beta^{(1)}(a_1)\beta^{(2)}(a_1+a_2) \right\} / \left[ a_1(\beta^{(1)}(a_1)(a_1+a_2\beta^{(2)}(a_1+a_2)))^2 \right]$$

Найдем математическое ожидание и дисперсию:

$$E\pi^{(1)} = \pi_1^{(1)};$$

$$D\pi^{(1)} = \pi_2^{(1)} - (\pi_1^{(1)})^2 = \frac{2a_1(\beta^{(1)}(a_1))' - (\beta^{(1)}(a_1))^2 + 1}{[a_1\beta^{(1)}(a_1)]^2};$$

$$E\pi^{(2)} = \pi_1^{(2)};$$

$$D\pi^{(2)} = \pi_2^{(2)} - (\pi_1^{(2)})^2 = \left\{ [1 - \beta^{(2)}(a_1+a_2)] \times \left[ a_1(\beta^{(1)}(a_1))' (a_2\beta^{(2)}(a_1+a_2)+a_1) + a_1\beta^{(2)}(a_1+a_2) + a_2\beta^{(2)}(a_1+a_2)(1 - \beta^{(1)}(a_1)) \right] + a_1^2(a_1+a_2)\beta^{(1)}(a_1)\beta^{(2)}(a_1+a_2) \right\} / \left[ a_1(\beta^{(1)}(a_1)(a_1+a_2\beta^{(2)}(a_1+a_2)))^2 \right]$$



Если время обслуживания экспоненциальное, то

$$\pi^{(1)}(s) = \beta^{(1)}(s) = \frac{b_1}{b_1 + s}, \quad E\pi^{(1)} = \frac{1}{b_1}, \quad D\pi^{(1)} = \frac{1}{b_1^2};$$

$$\pi^{(2)}(s) = \frac{a_1 b_1 + b_1 b_2 + b_2 s}{(b_1 + s)(a_1 + b_2 + s)},$$

$$E\pi^{(2)} = \frac{a_1 + b_1}{b_1(a_1 + b_2)},$$

$$D\pi^{(2)} = \frac{a_1(b_2 - b_1)(a_1 + a_2) + b_1 b_2(1 - a_1)(a_1 + b_1)}{b_1^2(a_1 + a_2)(a_1 + b_2)^2}.$$

Общий период занятости для системы равен:

$$\pi(s) = \frac{a_1}{a_1 + a_2} \pi^{(1)}(s) + \frac{a_2}{a_1 + a_2} \pi^{(2)}(s),$$

или в явном виде:

$$\pi(s) = \frac{(a_1 + a_2 + s) \left[ a_1 a_2 \beta^{(1)}(a_1 + s) \beta^{(2)}(a_1 + a_2 + s) + a_1(a_1 + s) \beta^{(1)}(a_1 + s) + a_2 s \beta^{(2)}(a_1 + a_2 + s) \right]}{(a_1 + a_2) \left[ a_1 + s + a_2 \beta^{(2)}(a_1 + a_2 + s) \right] \left[ s + a_1 \beta^{(1)}(a_1 + s) \right]}.$$

Тогда математическое ожидание и дисперсия для общего периода занятости равны:

$$D\pi = \frac{a_1^2}{(a_1 + a_2)^2} D\pi^{(1)} + \frac{a_2^2}{(a_1 + a_2)^2} D\pi^{(2)} + 2 \frac{a_1 a_2}{(a_1 + a_2)^2} [E\pi^{(1)} E\pi^{(2)} - E(\pi^{(1)} \pi^{(2)})] =$$

$$= \frac{a_1^2}{(a_1 + a_2)^2} \frac{2a_1(\beta^{(1)}(a_1))' - (\beta^{(1)}(a_1))^2 + 1}{[\beta^{(1)}(a_1)]^2} + \frac{a_2^2}{(a_1 + a_2)^2} \left\{ [1 - \beta^{(2)}(a_1 + a_2)] \times \right.$$

$$\times \left[ a_1(\beta^{(1)}(a_1))' (a_2 \beta^{(2)}(a_1 + a_2) + a_1) + a_1 \beta^{(2)}(a_1 + a_2) + a_2 \beta^{(2)}(a_1 + a_2) [1 - \beta^{(1)}(a_1)] \right] +$$

$$+ a_2^2 (a_1 + a_2) \beta^{(1)}(a_1) \beta^{(2)}(a_1 + a_2) \left. \right\} \left[ a_1 \beta^{(1)}(a_1) (a_1 + a_2 \beta^{(2)}(a_1 + a_2)) \right]^2 +$$

$$+ 2 \frac{a_1 a_2}{(a_1 + a_2)^2} \left\{ -3a_1 \beta^{(1)}(a_1) - a_2 \beta^{(2)}(a_1 + a_2) + a_2 (\beta^{(1)}(a_1))^2 \beta^{(2)}(a_1 + a_2) + a_1 (\beta^{(1)}(a_1))^2 + \right.$$

$$\left. + (a_1 a_2 + a_1 - 2a_2) \beta^{(1)}(a_1) \beta^{(2)}(a_1 + a_2) + a_1 \right\} \left[ a_1^2 (\beta^{(1)}(a_1))^2 (a_1 + a_2 \beta^{(2)}(a_1 + a_2)) \right]$$

Полученные выражения чрезвычайно громоздки, но, к счастью, нам можно ими не пользоваться, так как по нашей методике определения параметров помех по метеофакторам обработке судов в морских портах (3) помехи определяются как сумма потоков волн и ветра, превышающих допустимый уровень, независимо от направления их действия. Для портового перегрузочного оборудования не имеет значения «откуда ветер дует», важно с какой силой. Данные результаты могут быть использованы в авиации для получения расчётных параметров по взлётно-посадочным полосам, так как там направление помех от ветра очень важно.

### 2.3. Исследование модели В1

Для оценки количества судов, находящихся в порту, включая суда на рейде, рассмотрена модель В1 – однолинейная СМО с «ненадёжным» прибором – рис 3.

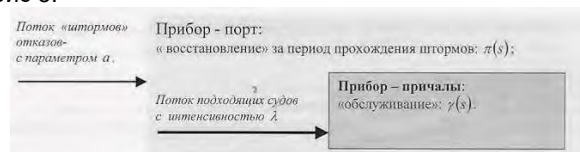


Рис. 3

Входящий поток – пуассоновский поток подходящих к порту судов. Время обслуживания – выбранный нами параметр – длительность интервалов времени между освобождением места у какого-нибудь причала порта для судна, ожидающего на рейде. (Именно этими интервалами определяется продвижение судов из очереди на рейде к причалам порта.) Выход из строя прибора, как в свободном, так и в занятом обслуживанием состоянии определяется наступлением шторма – событием пуассоновского потока с интервалами между событиями – интервалами между наступлением штормов. Длительность восстановления работоспособности прибора – определяемая в модели А1 длительность простоя причала из-за воздействия метеофакторов. Суда, оказавшиеся в порту при наступлении шторма «дообслуживаются» после его окончания. Интересующая нас характеристика – количество судов, находящихся в порту, – оценивается посредством представленной в модели. В1 характеристики – количество требований в системе. Время пребывания в порту пришедших судов оценивается посредством представленной в модели. В1 характеристики – возможного времени пребывания требований в системе. Входящий поток, подходящих к порту судов, – пуассоновский с интенсивностью λ. Время обслуживания на приборе имеет произвольное распределение, с преобразованием Лапласа-Стилтьеса γ(s). Через γ<sub>1</sub> и γ<sub>2</sub> обозначим первый и второй момент для γ(s). Будем интерпретировать наступление шторма, как выход прибора из строя, причем время восстановления прибора имеет преобразование Лапласа-Стилтьеса π(s), которое было определено в модели А1.

Для такой СМО можно рассчитать время пребывания вызова в системе, количество вызовов в очереди и время ожидания начала обслуживания.

h(s) = γ(s + a - aπ(s)) - преобразование Лапласа-Стилтьеса функции распределения H(t), имеющей следующий смысл: H(t) есть функция распределения длительности промежутка времени, начинающегося с момента начала обслуживания вызова до момента окончания его обслуживания. Первый, второй и третий моменты H(t) равны соответственно:

$$h_1 = \gamma_1(1 + a\pi_1), \quad h_2 = \gamma_2(1 + a\pi_1)^2 + a\gamma_1\pi_2,$$

$$h_3 = \gamma_3(1 + a\pi_1)^3 + 3a\gamma_2\pi_2(1 + a\pi_1) + a\gamma_1\pi_3.$$

L - случайная величина, представляющая количество клиентов, находящихся в системе в установившемся режиме. При условии производящая функция распределения дискретной целочисленной случайной величины L равна:

$$P(z) = \sum_{k \geq 0} z^k p_k = \frac{[a + \lambda - \lambda z - a\pi(\lambda - \lambda z)](1 - \lambda h_1) h(\lambda - \lambda z)}{[h(\lambda - \lambda z) - z][\lambda + a\lambda\pi_1]}.$$

С помощью производящей функции находим первые два момента для L:

$$\sum_{k \geq 1} k p_k = P'(1) = \frac{\lambda^2 \gamma_2 (1 + a \pi_1)^2 + a \lambda^2 \gamma_1 \pi_2}{2(1 - \lambda \gamma_1 - a \lambda \gamma_1 \pi_1)} + \frac{1}{2} \frac{a \lambda \pi_2}{1 + a \pi_1} + \lambda \gamma_1 (1 + a \pi_1) \quad (1)$$

$$\sum_{k \geq 1} k^2 p_k = P''(1) + P'(1) = \frac{\lambda^3 h_3}{1 - \lambda h_1} + \lambda^2 h_2 + \frac{a \lambda^2 (\pi_3 + 3 h_1 \pi_2)}{3(1 + a \pi_1)} + \left[ \frac{\lambda^2 h_2}{1 - \lambda h_1} + 1 \right] \frac{a \lambda \pi_2}{2(1 + a \pi_1)} + \lambda h_1 \left[ \frac{\lambda^2 h_2}{1 - \lambda h_1} + 1 \right] + \frac{1}{2} \left[ \frac{\lambda^2 h_2}{1 - \lambda h_1} \right]^2 + \frac{1}{2} \frac{\lambda^2 h_2}{1 - \lambda h_1}$$

Отсюда найдем дисперсию  $L$  :

$$DL = \frac{\lambda^3 h_3}{1 - \lambda h_1} + \lambda^2 h_2 + \frac{a \lambda^2 \pi_3}{3(1 + a \pi_1)} + \frac{a \lambda \pi_2}{2(1 + a \pi_1)} + \lambda h_1 \left[ \frac{\lambda^2 h_2}{2(1 - \lambda h_1)} + 1 \right] + \frac{1}{4} \left[ \frac{\lambda^2 h_2}{1 - \lambda h_1} \right]^2 + \frac{1}{2} \frac{\lambda^2 h_2}{1 - \lambda h_1} - \frac{1}{4} \left[ \frac{a \lambda \pi_2}{1 + a \pi_1} \right]^2 - \lambda^2 h_1^2$$

Обозначим через  $V(t)$  функцию распределения времени пребывания клиента (судна) в системе. Тогда для соответствующего ей преобразования Лапласа-Стилтьеса  $v(s)$  будет верно соотношение:

$$P(z) = v(\lambda - \lambda z).$$

С помощью этого соотношения можно найти первый и второй моменты, а также дисперсию времени пребывания клиента (судна) в системе:

$$Ev = v_1 = \frac{\lambda \gamma_2 (1 + a \pi_1)^2 + a \lambda \gamma_1 \pi_2}{2(1 - \lambda \gamma_1 - a \lambda \gamma_1 \pi_1)} + \frac{1}{2} \frac{a \pi_2}{1 + a \pi_1} + \gamma_1 (1 + a \pi_1)$$

$$v_2 = \frac{\lambda h_3}{1 - \lambda h_1} + h_2 + \frac{a[\pi_3 + 3h_1\pi_2]}{3(1 + a\pi_1)} + \frac{a\lambda\pi_2 h_2}{2(1 - \lambda h_1)(1 + a\pi_1)} + \frac{\lambda h_1 h_2}{1 - \lambda h_1} + \frac{1}{2} \left[ \frac{\lambda h_2}{1 - \lambda h_1} \right]^2,$$

$$Dv = \frac{\lambda h_3}{1 - \lambda h_1} + h_2 + \frac{a\pi_3}{3(1 + a\pi_1)} + \frac{1}{4} \left[ \frac{\lambda h_2}{1 - \lambda h_1} \right]^2 - \frac{1}{4} \left[ \frac{a\pi_2}{1 + a\pi_1} \right]^2 - h_1^2.$$

Для нахождения характеристик времени ожидания начала обслуживания нужно воспользоваться соотношением:

$$v(s) = \omega(s)h(s),$$

где  $\omega(s)$  - преобразование Лапласа-Стилтьеса для времени ожидания начала обслуживания.

Математическое ожидание и дисперсия для  $\omega$  равны:

$$E\omega = \omega_1 = v_1 - h_1, \quad \omega_2 = v_2 - 2\omega_1 h_1 - h_2,$$

$$D\omega = \omega_2 - \omega_1^2,$$

или, соответственно:

$$\omega_1 = \frac{\lambda \gamma_2 (1 + a \pi_1)^2 + a \lambda \gamma_1 \pi_2}{2(1 - \lambda \gamma_1 - a \lambda \gamma_1 \pi_1)} + \frac{1}{2} \frac{a \pi_2}{1 + a \pi_1} \quad (2)$$

$$\omega_2 = \frac{\lambda h_3}{1 - \lambda h_1} + \frac{a \pi_3}{3(1 + a \pi_1)} + \frac{a \lambda \pi_2 h_2}{2(1 - \lambda h_1)(1 + a \pi_1)} + \frac{1}{2} \left[ \frac{\lambda h_2}{1 - \lambda h_1} \right]^2$$

Рассмотрим несколько частных случаев:

1. Если время обслуживания на приборе имеет экспоненциальное распределение с параметром  $C$ , то

$$\sum_{k \geq 1} k p_k = \frac{2\lambda^2(1+a\pi_1)^2 + a\lambda^2 c \pi_2}{2c(c-\lambda_1 - a\lambda\pi_1)} + \frac{1}{2} \frac{a\lambda\pi_2}{1+a\pi_1} + \frac{\lambda(1+a\pi_1)}{c} \quad v_1 = \frac{2\lambda(1+a\pi_1)^2 + a\lambda c \pi_2}{2(c-\lambda_1 - a\lambda\pi_1)} + \frac{1}{2} \frac{a\pi_2}{1+a\pi_1} + \frac{1+a\pi_1}{c}$$

$$\omega_1 = \frac{2\lambda(1+a\pi_1)^2 + a\lambda c \pi_2}{2c(c-\lambda_1 - a\lambda\pi_1)} + \frac{1}{2} \frac{a\pi_2}{1+a\pi_1}$$

2. Если продолжительность шторма имеет экспоненциальное распределение с параметром  $b$ ,

то тогда (см. систему **A**)  $\pi(s) = \frac{b}{b+s}$ . В этом случае первые моменты общего количества судов в порту и времени ожидания начала обслуживания имеют вид:

$$\sum_{k \geq 1} k p_k = \frac{\lambda^2 \gamma_2 (b+a)^2 + 2a\lambda^2 \gamma_1}{2b(b-b\lambda\gamma_1 - a\lambda\gamma_1)} + \frac{a\lambda}{b(a+b)} + \lambda \gamma_1 \left( 1 + \frac{a}{b} \right)$$

$$v_1 = \frac{\lambda \gamma_2 (b+a)^2 + 2a\lambda \gamma_1}{2b(b-b\lambda\gamma_1 - a\lambda\gamma_1)} + \frac{a}{b(a+b)} + \gamma_1 \left( 1 + \frac{a}{b} \right)$$

$$\omega_1 = \frac{\lambda \gamma_2 (b+a)^2 + 2a\lambda \gamma_1}{2b(b-b\lambda\gamma_1 - a\lambda\gamma_1)} + \frac{a}{b(a+b)}$$

3. Если и время обслуживания на приборе, и продолжительность шторма имеют экспоненциальное распределение, то

$$\sum_{k \geq 1} k p_k = \frac{\lambda^2 (a+b)^2 + \lambda^2 a c}{bc(bc - \lambda b - \lambda a)} + \frac{a\lambda}{b(a+b)} + \frac{\lambda(a+b)}{bc}$$

$$v_1 = \frac{\lambda(a+b)^2 + \lambda a c}{bc(bc - \lambda b - \lambda a)} + \frac{a}{b(a+b)} + \frac{a+b}{bc}$$

$$\omega_1 = \frac{\lambda(a+b)^2 + \lambda a c}{bc(bc - \lambda b - \lambda a)} + \frac{a}{b(a+b)}$$

Для практических расчетов важны именно формулы (1) и (2). Первая формула позволяет находить среднее число заявок в системе или в нашем случае среднее число судов в порту. Вторая – среднее время ожидания обслуживания или в нашем случае – среднее время простоев судов в порту.

#### 2.4. Исследование модели В2

Для расчетов при работе на группе взаимозаменяемых причалов рассмотрим модель **B2** – СМО с пуассоновским входящим потоком с параметром  $\lambda$  и  $n$  параллельно работающими приборами (причалами) – рис.4.

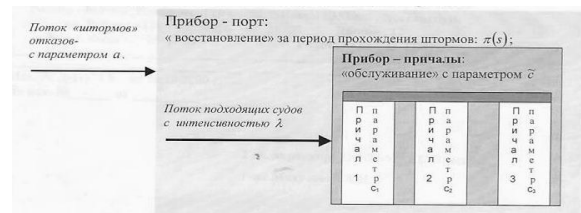


Рис. 4

Время обслуживания на всех приборах экспоненциальное с параметрами  $c_1, \dots, c_n$ .

Аналогично модели **B1** будем интерпретировать шторм как выход приборов из строя, причем, естественно, приборы выходят из строя и восстанавливаются одновременно. Заметим, что при  $n = 1$  система **B2** совпадает с системой **B1**. Так как время обслуживания на любом приборе экспоненциальное, то можно рассматривать все приборы как один прибор (группу взаимозаменяемых причалов в целом) с экспоненциальным временем обслуживания суммарной мощности ( $\tilde{c} = c_1 + \dots + c_n$ ).

Полученная модель в точности совпадает с моделью

**В1** (при экспоненциальном времени обслуживания вызовов), для которой уже получено распределение случайной величины  $\tilde{L}$  - общего количества судов в

порту и характеристики распределения времени пребывания в порту и времени ожидания на рейде.

Таблица 1

Номер месяца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
Число суток в месяце	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
Число случаев простоев по метеофакторам	8	4	4	5	5	1	4	3	5	6	9	6	60
Интенсивность потока помех -	0,258	0,143	0,189	0,167	0,161	0,033	0,189	0,097	0,167	0,194	0,300	0,193	0,164
Число суток простоя по метеофакторам	17,50	7,50	5,62	2,12	5,38	0,62	3,25	1,75	8,25	4,62	11,96	15,88	84,45
Среднее время действия потока помех -	2,19	1,88	1,40	0,42	1,08	0,62	0,81	0,58	1,65	0,77	1,33	2,65	1,41

Таблица 2

Номер месяца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
Число суток	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
Количество судов, шт.	9	9	12	9	10	9	9	11	11	14	13	8	124
Дедевит, тыс. т	110,0	110,5	110,7	113,3	117,4	110,0	110,4	105,5	94,7	91,5	102,5	135,9	109,4
Валовое время, сут.	51,8	66,1	96,0	20,7	27,6	14,0	10,9	26,1	25,9	31,0	63,6	45,3	460,1
Время обработки, сут.	11,9	12,0	16,6	10,2	11,5	9,7	10,6	14,1	14,0	17,2	17,1	11,0	155,9
Среднее время обработки судна, сут.	1,32	1,32	1,39	1,13	1,15	1,08	1,18	1,29	1,27	1,23	1,32	1,38	1,26
Валовые простои, сут.	40,0	54,1	52,3	10,5	16,1	4,3	8,5	12,0	11,9	13,8	46,5	34,2	304,2
Объём нефти, тыс. т.	986	995	1264	1021	1144	984	1036	1160	1041	1281	1333	869	13115
Интенсивность судозаходов.	0,29	0,321	0,387	0,300	0,322	0,300	0,290	0,354	0,366	0,145	0,433	0,258	0,340

### 3. Проверка правильности получения данных по простоям судов по полученным моделям СМО сравнением с фактическими данными

Для проверки правильности разработанного метода определения простоев судов при работе на рейдовых причалах с помощью новых моделей СМО были использованы данные метеостанции и гидрологического поста, по которым были получены годовые характеристики потока помех обработке судов на глубоководном рейдовом причале нефтегазавани Шесхарис, данные представлены в табл. 1. За этот же год по отчётным данным нефтерайона были получены эксплуатационные характеристики работы этого причала, данные – в табл. 2.

Из таблиц 1, 2 получены следующие основные данные:

- эксплуатационный период  $Tэ = 365$  суток,
- количество обработанных судов –  $пс = 124$  судна,
- время обработки судов  $Tобр = 155,9$  суток,
- количество помех  $ппом. = 60$  помех,
- время действия помех  $Tпом. = 84,45$  суток.
- фактическое время простоя судов  $Tпр = 304,2$  суток.

В результате обработки получены следующие характеристики потока помех и судов для наших расчётов  $\lambda_n = 0,164$ ;  $Vn = 1,41$ ;  $\lambda_c = 1,41$ ;  $Vc = 1,26$ .

В обозначениях, принятых при выводе расчетных формул по модели В получены следующие характеристики: интенсивность потока помех  $a = 0,164$ ; первый и второй моменты продолжительности помех  $\pi_1 = 1,41$ ,  $\pi_2 = 3,98$ ; интенсивность потока судов  $\lambda = 0,34$ ; первый и второй моменты длительности обслуживания судов  $\gamma_1 = 1,26$ ,  $\gamma_2 = 3,2$ .

При расчете через длину очереди по формуле 18 вычисляем математическое ожидание среднесуточного числа судов в порту:

$$\lambda_c = \sum_{k \geq 1} k p_k = P'(1) = \frac{\lambda^2 \gamma_2 (1 + a \pi_1)^2 + a \lambda^2 \gamma_1 \pi_2}{2(1 - \lambda \gamma_1 - a \lambda \gamma_1 \pi_1)} + \frac{1}{2} \frac{a \lambda \pi_2}{1 + a \pi_1} + \lambda \gamma_1 (1 + a \pi_1) =$$

$$= \frac{0,34^2 \cdot 3,2(1 + 0,164 \cdot 1,41)^2 + 0,164 \cdot 0,34^2 \cdot 1,26 \cdot 3,98}{2(1 - 0,34 \cdot 1,26 - 0,164 \cdot 0,34 \cdot 1,26 \cdot 1,41)} + \frac{1}{2} \frac{0,164 \cdot 0,34 \cdot 3,98}{1 + 0,164 \cdot 1,41} + 0,34 \cdot 1,26(1 + 0,164 \cdot 1,41) = 1,32$$

По этой величины вычисляем среднесуточное число судов, находящихся под обработкой, равное

$$\lambda_{с\text{обр}} = T_{обр} / T_{э} = 155.9 / 365 = 0.428.$$

Средняя длина очереди равна:

$$l_{оч} = l_{с} - l_{обр} = 1.32 - 0.428 = 0.892$$

Общее время простоев судов равно:

$$T_{пр} = T_{э} l_{оч} = 365 * 0.892 = 325.6 \text{ судосудок.}$$

Процент различия между данными расчета и практики равен

$$\% = \frac{3235,6 - 304,2}{325,6} \cdot 100\% = 6,6\%$$

При расчете через время ожидания: по формуле 19 находим среднее время ожидания начала обслуживания:

$$\omega_1 = \frac{\lambda \gamma_2 (1 + a \pi_1)^2 + a \lambda \gamma_1 \pi_2 + \frac{1}{2} \frac{a \pi_2}{1 + a \pi_1}}{2(1 - \lambda \gamma_1 - a \lambda \gamma_1 \pi_1)} = \frac{0,34 \cdot 3,2(1 + 0,164 \cdot 1,41)^2 + 0,164 \cdot 0,34 \cdot 1,26 \cdot 3,98}{2 \cdot (1 - 0,34 \cdot 1,26 - 0,164 \cdot 0,34 \cdot 1,26 \cdot 1,41)} + \frac{1}{2} \cdot \frac{0,164 \cdot 3,98}{1 + 0,164 \cdot 1,41} = 2,32$$

Общее время простоев судов равно

$$T_{пр} = n_{с} w_1 = 124 * 2,32 = 287,7 \text{ судосудок.}$$

Процент различия между данными расчета и практики равен

$$\% = \frac{304,2 - 287,7}{304,2} \cdot 100\% = 5,4\%$$

Для вероятностных расчетов расхождения незначительны.

### Заключение

1. Исследованы новые модели СМО для расчета простоев судов на рейдовых причалах с учетом потока помех по метеофакторам (штормов как потока случайных событий)

2. Подучены расчетные формулы для определения простоя судов на рейдовых причалах

3. Выполненные поверочные расчеты показали высокое для вероятностного процесса приближение к реальным статистическим данным практики.

4. Методика была апробирована при расчете простоев судов на рейдовом причале нефтегазавани Шесхарис и терминале ЗАО Таманьнефтегаз в порту Железный Рог и получила положительное заключение со стороны специалистов.

### Литература

1. Нормы технологического проектирования морских портов, СП 350.1326000. 2018.
2. Горгуца Ю.В. Новые методы принятия решений при проектировании и эксплуатации морских портов. – М. МГУ, изд. МАКС Пресс. 2001 г.
3. Горгуца Ю.В. Методика определения параметров помех по метеофакторам обработке судов в морских портах. – С. П-г, МИТ № 1 (37) Т. 1 2020.
4. В. Феллер. Введение в теорию вероятностей и её приложения. М. Мир.1967.
5. Владимиров В.Н., Матвеев В.Ф. Системы обслуживания с преимуществом и «разогревом», в сб. «Вычислительные методы и программирования», 1967, №6, ВЦ МГУ.
6. Матвеев В.Ф., Ушаков В.Г. Системы массового обслуживания. М. МГУ. 1984.
7. Д.Р. Кокс, В. Л. Смит. Теория восстановления. М. Советское радио, 1967.

### References

1. Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov [Sea ports design standards] SP 350.1326000. 2018.
2. Gorgutsa Yu.V. Novye metody prinyatiya resheniy pri proektirovanii i ekspluatatsii morskikh portov [New methods of decision making in sea port design and operation] – M. MGU, izd. MAKS Press. 2001 g.
3. Gorgutsa Yu.V. Metodika opredeleniya parametrov pomekh po meteofaktoram obrabotke sudov v morskikh portakh [Methodology for measuring weather interference parameters in vessel processing in sea ports]. – S. P-g, MIT № 1 (36) T. 1 2020.
4. V. Feller. Vvedenie v teoriyu veroyatnostej i ejo prilozhenija [Introduction to probability theory and its applications] . M. Mir.1967.
5. Vladimirov V. Matveev V.F. Sistemy obsluzhivaniya s preimushchestvom i «razogrevom» [Service systems with advantage and "warm-up"] v sb. «Vychislitel'nye metody i programmirovaniya» 1967, №6, VTs MGU.
6. Matveev. V.F., Ushakov V.G. Sistemy massovogo obsluzhivaniya [Systems of mass service]. M. MGU. 1984.
7. D.R. Koks, V. L. Smit. Teoriya vosstanovleniya [Theory of recovery]. M. Sovetskoe radio, 1967.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Юлий Васильевич Горгуца**, кандидат технических наук. Генеральный директор, ЮгМорСтрой – Т, 353920, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Дзержинского 183, e-mail: yugor@inbox.ru

**Yuliy V. Gorgutsa**, Ph.D. (Eng), CEO, YugMorStroy-T, 353920, Krasnodarskiy Kray, Novorossiysk, pr. Dzerzhinsky 183, e-mail: yugor@inbox.ru



## АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 62.83

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.015

### Исследование режимов и расчет параметров работы частотно-управляемого электропривода судового якорного устройства

Э.А. Гасанов<sup>1</sup><sup>1</sup>Азербайджанская Государственная Морская Академия

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы, связанные с исследованием режимов работы и расчета параметров частотно-управляемого электропривода судового якорного устройства. Исследования и расчеты показали, что применение частотных преобразователей для управления электродвигателем якорного устройства, позволяет увеличить диапазон регулирования скорости и более плавно регулировать скорость. При этом возрастает надежность работы и упрощается эксплуатация судового якорного устройства. Сокращение числа трехфазных статорных обмоток электродвигателя позволяет уменьшить объем, вес и стоимость устройства в целом. К преимуществам частотного управления электроприводом добавляется ещё и возможность исключения перехода электродвигателя в режим короткого замыкания при отрыве якоря от грунта. Выявлены возможности улучшения режимов работы электропривода, а также исключение режима короткого замыкания электродвигателя при отрыве якоря от грунта.

**Ключевые слова:** судно, якорь, грунт, электропривод, электродвигатель, частота вращения, частотное управление, момент.

### The investigation of the modes and calculation of the operation parameters in the frequency controlled drive on the ship's anchor device

Elsevar A. Hasanov<sup>1</sup><sup>1</sup>Azerbaijan State Marine Academy

**Abstract.** The issues related to the investigation of operating modes and calculation parameters in the frequency controlled drive on the ship's anchor device are investigated in the article. Research and analyses indicate that the appliance of the frequency convertor for regulation of the engine on the anchor device allows to increase the range of speed regulation and regulate the speed more easily. Operation reliability is increasing in this process and exploitation of the ship's anchor device is reducing. Numerical cancellation of stator winding in the engine allows to decrease the capacity, weight, cost of the whole device. Possible exception or entry the engine into the short circuit by breaking away the anchor off the ground is added to the frequency controlled device. Improvement possibility of the operation mode in the drive, as well as exceptional mode of short circuit engine in case of break away anchor off the ground are revealed in the article.

**Key words:** ship, anchor, ground, drive, engine, rotation frequency, frequency control, moment.

#### Введение

Якорно-швартовные устройства предназначены для осуществления швартовки судна к причалу и безопасной стоянки судна на относительно малых глубинах

В настоящее время электроприводы якорно-швартовных механизмов с многоскоростным асинхронным электродвигателем не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к современному электрооборудованию. Проведенные исследования показывают, что управление электродвигателем якорно-швартовного устройства с помощью частотных преобразователей может дать технические и экономические преимущества устройству [2, 4].

Учитывая вышеуказанное, в статье рассмотрены задачи улучшения напряженного режима работы электроприводов якорного устройства. Известно, что назначением электроприводов якорных устройств является выбор якорной цепи и подъем якоря. Травление якоря происходит с помощью специального электрогидравлического тормоза.

Целью статьи является определение возможности исключения режима короткого замыкания (остановка под током) частотно-

управляемого асинхронного двигателя якорного устройства при отрыве якоря от грунта.

#### Изложение основного материала исследования

На рисунке 1 показана нагрузочная диаграмма электродвигателя во время вывешивания якорной цепи [1, 4]. После включения электропривода якорного устройства, в течение времени  $t_1$  (I этап) выбирается часть якорной цепи, лежащей на грунте. В это время, за счет силы действия электропривода, судно начинает движение в сторону якоря. Так как на этом этапе выбирается свободно свисающая часть цепи, то момент  $M_{c1}$  на валу электродвигателя, а также частота вращения  $n_1$  остаются неизменными.

На втором этапе судно продолжает двигаться в сторону якоря и момент сопротивления  $M_{c2}$  на валу электродвигателя растет в функции времени. Вследствие этого растет ток нагрузки электродвигателя и снижается частота вращения. В конце второго этапа носовая часть судна располагается примерно над местом закладки якоря.

В течение времени  $t_3$  (III этап) под действием электропривода и движения судна вследствие инерции якорь отрывается от грунта. На этом этапе момент сопротивления  $M_{c3}$  на валу

электродвигателя принимает большое значение, и в течение малого времени электродвигатель ( $n_3=0$ ) работает в режиме короткого замыкания.

Так как этот этап является кратковременным и электродвигатель выпускается в специальном исполнении (способным выдерживать короткое замыкание в течение 30 сек.), он выдерживает этот режим.

На четвертом этапе, в течение времени  $t_4$ , происходит подъем якоря. Тяговое усилие определяется массой якоря и цепи. На этом этапе момент  $M_{с4}$  на валу электродвигателя постепенно снижается, а скорость вращения увеличивается, и процесс съёмки с якоря заканчивается.

Рассматривая процесс съёмки с якоря, можно отчетливо увидеть, что режим работы электродвигателя якорного устройства изменяется в широком масштабе. Из нагрузочной диаграммы, изображенной на рисунке 1, видно, что электродвигатель в течение малого времени останавливается под нагрузкой (режим короткого замыкания). Вследствие этого ток, потребляемый электродвигателем из сети, превышает номинальный ток в 5÷7 раз [4].

Следует отметить, что в случае применения частотных преобразователей, предложенных для управления электроприводом якорного устройства, возможно избежать перехода электродвигателя в режим короткого замыкания (остановки под нагрузкой).

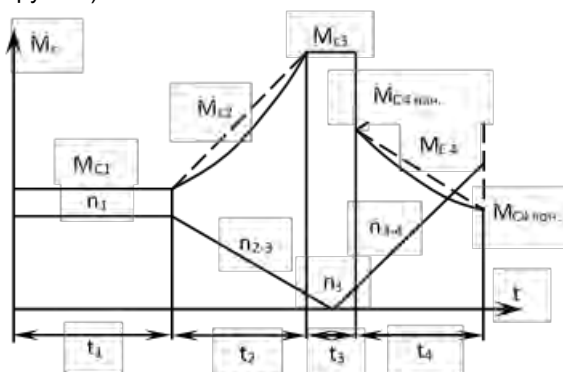


Рис. 1. Нагрузочная диаграмма электродвигателя во время выбирания якорной цепи

Конечно же, невозможно уменьшить момент сопротивления, возникающий при отрыве якоря от грунта, однако можно увеличить максимальный момент, создаваемый электродвигателем, путем изменения закона управления частотными преобразователями.

Для доказательства вышеуказанного используем параметры рабочей обмотки (2-ой обмотки) трехскоростного электродвигателя, наиболее часто применяемого на судах для электропривода якорного устройства.

Тип двигателя: МАП 622-4/8/16. Здесь 4, 8, 16 число полюсов обмоток, соответствующих высокой, средней и низкой скоростям. Соответственно, мощности обмоток:  $P_H=28/36/10$  кВт; номинальная скорость вращения  $n_H=1445/670/315$  об/мин. Находим параметры обмотки средней скорости ( $2P=8$ ). Перегрузочная способность обмотки:

$$\lambda_2 = \frac{M_{\max 2}}{M_{H2}} = 2,4 \quad (1)$$

Номинальный момент, создаваемый обмоткой:

$$M_{2H} = 9,81 \frac{975 \cdot P_{2H}}{n_{2H}} = 9,81 \frac{975 \cdot 36}{670} = 514 \text{ Нм} \quad (2)$$

Номинальное скольжение двигателя при работе данной обмоткой:

$$S_{2H} = \frac{n_{02} - n_{H2}}{n_{02}} = \frac{750 - 675}{750} = 0,106 \quad (3)$$

Соответственно находим критическое скольжение:

$$S_{2кр} = S_{2H} (\lambda_2 \pm \sqrt{\lambda_2^2 - 1}) = 0,106 \cdot (2,4 \pm \sqrt{2,4^2 - 1}) = 0,106 \cdot (2,4 + 2,18) = 0,48 \quad (4)$$

Максимальный (критический) момент, создаваемый обмоткой:

$$M_{2кр} = \lambda_2 \cdot M_{2H} = 2,4 \cdot 514 = 1233,6 \text{ Нм} \quad (5)$$

При частотном управлении электродвигателем якорного устройства использована только обмотка средней скорости ( $2P=8$ ) и далее будет проверена её способность обеспечивать необходимые режимы.

Например, рассмотрим регулирование скорости полупроводниковым преобразователем частоты широтно-импульсной модуляцией только обмотки средней скорости (второй обмотки), двигателя МАП-622. Такие частотные преобразователи обеспечивают регулирование скорости электродвигателя в 20÷30 раз ниже и в 1,5-2 раза выше номинальной [3, 6]. Выясним возможность избежать режима короткого замыкания при отрыве якоря от грунта путем применения частотного преобразователя для управления обмоткой ( $2P=8$ ).

Как известно, при применении частотного метода управления для сохранения постоянства перегрузочной способности асинхронного двигателя (на всех этапах управления), наряду с изменением частоты тока, подаваемого на двигатель, необходимо также изменять его напряжение. Постоянство перегрузочной способности асинхронного двигателя обеспечивается, если отношение критических (максимальных) моментов двигателя во всех режимах равно отношению соответствующих статических моментов нагрузки, т.е.

$$\frac{M_{cm.i}}{M_{cm.H}} = \frac{M_{\max.i}}{M_{\max.H}} \quad (6)$$

где  $M_{cm.i}$  и  $M_{\max.i}$  — соответственно, статический момент, создаваемый механизмом и максимальный момент электродвигателя во время регулирования.

$M_{ст.н}$  и  $M_{max.н}$  – значения статического и максимального момента при номинальной частоте вращения.

Если пренебречь активным сопротивлением статорной обмотки асинхронного электродвигателя, то его максимальный (критический) момент будет равен:

$$M_{max} = \frac{m_1 U_1^2}{2C_1 \omega_c X_k} = K \frac{U_1^2}{f_1^2} \quad (7)$$

где  $K = \frac{m_1 p^2}{8C_1 \pi^2 L_k}$  постоянная величина;

$L_k$  – индуктивность короткого замыкания;  
 $p$  – число пар полюсов двигателя.

Из курса Теории электропривода известно, что статический момент сопротивления многих механизмов зависит от угловой скорости ( $\omega$ ) двигателя, передающего вращательное движение механизму.

$$M_{ст} = M_0 + (M_n - M_0)^\alpha \quad (8)$$

где  $M_0$  – независимая часть момента статического сопротивления от угловой скорости.

$\alpha$  – показатель степени зависимости момента статического сопротивления от угловой скорости. Для основной части механизмов:  $\alpha = 0 \div 2$ .

Если не учитывать  $M_0$ , формулу (8) можно записать в следующем виде:

$$M_{ст} = C \omega^\alpha = C_1 f_i^\alpha \quad (9)$$

где  $C$  и  $C_1$  – постоянные величины.

Нужно заметить, что момент статического сопротивления якорного устройства остаётся неизменным при изменении угловой скорости  $M_{ст} = const$  и для такого случая  $\alpha = 0$  напряжения изменятся прямо пропорционально с частотой.

В этом случае можем записать:

$$\frac{U_{1i}}{U_n} = \frac{f_i}{f_n} \quad (10)$$

$$U_i = U_n \varphi_i \quad (11)$$

Отсюда  $\varphi_i = \frac{f_i}{f_n}$  – относительное изменения частоты

тока, подаваемого на двигатель.

Известно, что при изменении частоты тока, будет изменяться синхронная скорость поля статора  $\omega_c$  и индуктивные сопротивления обмоток двигателя.

Выразим их через соответствующие значения при номинальных параметрах питающей сети:

Вращающийся магнитный поток статора:

$$\omega_{сн} = \frac{2\pi f_n}{P}; \quad \omega_{сф} = \omega_{сн} \cdot \varphi \quad (12)$$

Реактивное сопротивление короткого замыкания двигателя:

$$X_k = X_{кн} \cdot \varphi \quad (13)$$

Формула критического скольжения при переменной частоте имеет вид:

$$S_{кр.ф} = \pm \frac{C_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + X_k^2} \cdot \varphi^2} \quad (14)$$

Если здесь сопротивление статора принять  $r_1 = 0$ , то при изменении частоты критическое скольжение и упрощенная формула Клосса будут иметь вид:

$$S_{кр.ф} = \pm \frac{C_1 r_2'}{\varphi \cdot X_k} = \frac{S_{кр}}{\varphi} \quad (15)$$

$$M_f = \frac{2M_{кр}}{\frac{S}{S_{кр} \cdot \varphi} + \frac{S_{кр}}{S}} \quad (16)$$

Если подставить формулу (15) в формулу Клосса (16), получим новое выражение для изменения напряжения и частоты [2]:

$$M_f = \frac{2M_{кр}}{\frac{S \cdot \varphi}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S \cdot \varphi}} \quad (17)$$

Используя формулу (17) для рабочей обмотки асинхронного двигателя типа МАП-622, построим механическую характеристику, образующуюся при разных значениях частоты.

Регулирование ведётся уменьшением частоты тока, начиная с номинального, сохранив при этом номинальное значение напряжения (380 В).

Максимальный (критический) момент двигателя прямо пропорционален квадрату напряжения и обратно пропорционален квадрату частоты

$M_{кр} \equiv \frac{U^2}{f^2}$ . Поэтому для построения механических

характеристик при уменьшенных значениях частоты, необходимо вычислять новый максимальный момент. Для построения механических характеристик использована формула (17).

$$1. U = U_n = 380 \text{ В}; f_n = 50 \text{ Гц}; \varphi = \frac{f}{f_n} = \frac{50}{50} = 1$$

$$M_{кр1} = \frac{M_{крн}}{\varphi^2} = \frac{1233,6}{1^2} = 1233,6 \text{ Нм}$$

$$M = \frac{2 \cdot M_{кр1}}{\frac{S \cdot \varphi}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S \cdot \varphi}} = \frac{2 \cdot 1233,6}{\frac{S \cdot 1}{0,48} + \frac{0,48}{S \cdot 1}} \quad (18)$$

$$2. \quad U = U_n = 380 \text{ В}; \quad f = 0,8 \cdot f_n = 0,8 \cdot 50 = 40 \text{ Гц}$$

$$\varphi = \frac{f}{f_n} = \frac{40}{50} = 0,8$$

$$M_{кр2} = \frac{M_{крн}}{\varphi^2} = \frac{1233,6}{0,8^2} = 1927,5 \text{ Нм}$$

$$M = \frac{2 \cdot M_{кр2}}{\frac{S \cdot \varphi}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S \cdot \varphi}} = \frac{2 \cdot 1927,5}{\frac{S \cdot 0,8}{0,48} + \frac{0,48}{S \cdot 0,8}} \quad (19)$$

$$3. \quad U = U_n = 380 \text{ В}; \quad f = 0,7 \cdot f_n = 0,7 \cdot 50 = 35 \text{ Гц}$$

$$\varphi = \frac{f}{f_n} = \frac{35}{50} = 0,7$$

$$M_{кр3} = \frac{M_{крн}}{\varphi^2} = \frac{1233,6}{0,7^2} = 2517,5 \text{ Нм}$$

$$M = \frac{2 \cdot M_{кр3}}{\frac{S \cdot \varphi}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S \cdot \varphi}} = \frac{2 \cdot 2517,5}{\frac{S \cdot 0,7}{0,48} + \frac{0,48}{S \cdot 0,7}} \quad (20)$$

С помощью программы MATLAB/Simulink [5] и формулы (18) - (20) произведен расчет механических характеристик двигателя при различных частотах питающего тока. На основе расчетных данных на рисунке 3 изображены механические характеристики обмотки средней скорости (2P=8) асинхронного электродвигателя типа МАП-622-4/8/16.

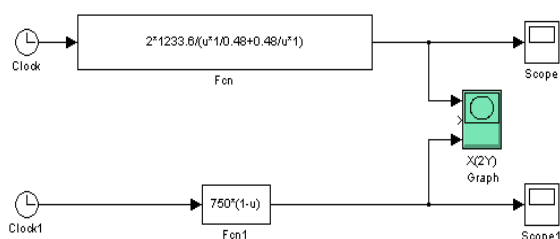


Рис. 2. Расчет естественной механической характеристики с помощью программы MATLAB/Simulink, обмотки средней скорости (2P=8) асинхронного электродвигателя типа МАП-622-4/8/16.

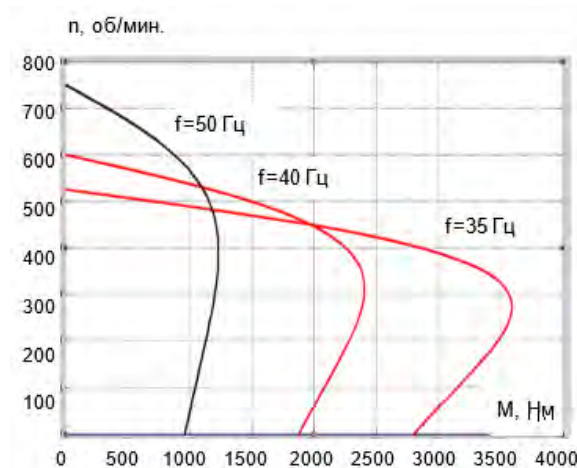


Рис. 3. Механические характеристики обмотки средней скорости (2P=8) асинхронного электродвигателя типа МАП-622-4/8/16 для значений частот  $f = 50, 40$  и  $35$  Гц.

Как видно из механической характеристики (рисунок 3) максимальный момент двигателя с уменьшением частоты увеличивается. Например, при  $f = 35$  Гц,  $M_{\max} = 2517,5$  Нм который в 2,04 раз больше максимального момента при

$$\frac{M_{\max}(f = 35 \text{ Гц})}{M_{\max}(f = 50 \text{ Гц})} = \frac{2517,5}{1233,6} = 2,04 \quad (21)$$

Произведем небольшой расчет для определения частоты тока, при которой без остановки электродвигателя якорь отрывается от грунта. Значение отрывной силы зависит от характера сцепления якоря с грунтом и в конкретных случаях является трудно определяемым.

Статистические исследования позволяют считать силу подрыва заиленного якоря Холла равной его двойному весу  $2G_y$ . Тогда отрывная сила на клюзе может быть вычислена [1]:

$$F_{отр} = 0,87[2G_y + (G_y + qh)] \quad (22)$$

где  $G_y$  – вес якоря (кг);

$q$  – вес одного метра якорной цепи;

$h$  – глубина стоянки на якорю, (м).

Приведенный здесь в качестве примера электродвигатель типа МАП 622-4/8/16 установлен в электроприводе якорного устройства на танкерах типа «Гянджа» Азербайджанской Республики.



Вес якоря на этих судах  $G_{я} = 2500$  кг.

Вес одного метра якорной цепи  $q = 51,62$  кг;

Глубину стоянки принимаем  $h = 100$  м;

Отрывная сила на клюзе этих судов:

$$F_{отп} = 0,87[2G_{я} + (G_{я} + qh)] = 0,87[2 \cdot 2500 + (2500 + 51,62 \cdot 100)] = 11016 \text{ кг}$$

$$\text{или } F_{отп} = 9,81 \cdot 11016 = 108067 \text{ Н}$$

Отрывная сила на звездочке якорного устройства:

$$F_{зв} = \frac{F_{отп}}{\eta_{кл}} = \frac{108067}{0,7} = 154381 \text{ Н}$$

где  $\eta_{кл}$  – К.П.Д. клюза.

Момент на валу электродвигателя якорного устройства

$$M_{эл.дв} = \frac{F_{зв} \cdot D_{зв}}{2 \cdot K \cdot \eta_{кл}}, \text{ Нм} \quad (23)$$

где  $D_{зв}$  – диаметр якорной звездочки,

$$D_{зв} = 0,7 \text{ м.}$$

$\eta_{кл}$  – К.П.Д. якорного устройства совместно с редуктором.  $\eta_{кл} = 0,65 \div 0,8$ , принимаем

$$\eta_{кл} = 0,7.$$

$K$  – передаточное число редуктора якорного устройства,  $K = 80$ .

$$M_{эл.дв} = \frac{F_{зв} \cdot D_{зв}}{2 \cdot K \cdot \eta_{кл}} = \frac{154381 \cdot 0,7}{2 \cdot 80 \cdot 0,7} = 965 \text{ Нм}$$

Как видно из результатов данного расчета момент сопротивления на валу электродвигателя при отрыве якоря от грунта ( $M_{от.я} = 965 \text{ Нм}$ ) почти в 2 раза больше чем номинальный момент электродвигателя ( $M_{н} = 514 \text{ Нм}$ ).

Если еще учесть, что при отрыве якоря от грунта, за счет увеличения потери напряжения на кабеле питающего электродвигатель, то момент еще ощутимей уменьшится, так как момент асинхронного двигателя зависит от квадрата напряжения  $M_{А.Д} \equiv U^2$ .

Следовательно, отрыв якоря от грунта без остановки двигателя может осуществляться, начиная с частоты тока 40 Гц, при котором максимальный момент двигателя 1,56 раз больше чем максимальный момент при 50 Гц.

### Заключение

Исследования и расчеты показали, что использование частотно-регулируемых электроприводов якорного устройства имеет следующие преимущества в сравнении с существующими электроприводами:

1. Возрастает диапазон и плавность регулирования скорости.
2. При управлении с применением частотных преобразователей по сравнению с управлением с помощью контактной аппаратуры повышается надежность работы, упрощается эксплуатация якорного устройства.
3. При сокращении количества фазных обмоток статора снижаются массогабаритные показатели и стоимость, упрощается конструкция.
4. Исключение возможного перехода электродвигателя в режим короткого замыкания при отрыве якоря от грунта.

### Литература

1. Мехтиев Г.А., Гасанов З.А., Шабанов Т.Г., «Судовые автоматизированные электроприводы», Баку, изд. «Нурлан», 2005, 358 с.
2. Мехтиев Г.А., Гасанов Э.А. Исследование режимов работы частотно управляемого электропривода судового якорного устройства. Одесского Национального Морского Университету. Весник. №3 (52), 2017, ст 142-153.
3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. Учебник для вузов. – М.: Издательский центр «Академия», 2007, 277 с.
4. Султанов Э.Ф., Гасанов Э.А., «Основные преимущества управления электроприводом якорного устройства с помощью частотных преобразователей», Научные труды Азербайджанской Государственной Морской Академии №2, Баку, 2015, ст. 201-208.
5. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB SimPowerSystems и Simulink / СПб.: Питер, 2008. 288 с.
6. Holmes D. G. Pulse width modulation for power converters: Principles and Practice / New-York: Wiley-IEEE Press, 2003, 734 p.

### References

1. Mehtiev G.A., Gasanov Z.A., Shabanov T.G., «Sudovye avtomatizirovannye jelektroprivody», Baku, izd. «Nurlan», 2005, 358 s.
2. Mehtiev G.A., Gasanov Je.A. Issledovanie rezhimov raboty chastotno upravlyaemogo jelektropri-voda sudovogo jakornogo ustrojstva. Odeskogo Nacional'nogo Mors'kogo Universitetu. Vesnik. №3 (52), 2017, st 142-153.
3. Sokolovskij G.G. Jelektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem. Uchebnik dlja vuzov. – M.: Izdatel'skij centr «Akademija», 2007, 277 s.
4. Sultanov Je.F., Gasanov Je.A., «Osnovnye preimushhestva upravlenija jelektroprivodom jakornogo ustrojstva s pomoshh'ju chastotnyh preobrazovatelej», Nauchnye trudy Azerbajdzhanskoj Gosudarstvennoj Morskoj Akademii №2, Baku, 2015, st. 201-208.

5. Chernyh I. V. Modelirovanie jelectrotehnicheskikh ustrojstv v MATLAB SimPowerSystems i Simulink / SPb.: Piter, 2008. 288 s.
6. Holmes D. G. Pulse width modulation for power converters: Principles and Practice / New-York: Wiley-IEEE Press, 2003, 734 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Эльсевар Акиф оглы Гасанов**, старший преподаватель кафедры (докторант) «Судовая электроавтоматика», Азербайджанская Государственная Морская Академия, AZ1000 Баку, ул. Зарифы Алиевой, 18, e-mail: hasanov.079@mail.ru

**Elsevar Akif oglu Hasanov**, senior lecturer (graduate student), department of "Marine electrical automation" of Azerbaijan State Marine Academy, 18, Z. Aliyeva str., AZ1000, Baku, e-mail: hasanov.079@mail.ru

## УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 658.8

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.016

### Оценка имиджа судоходной компании

А.А. Исаев<sup>1</sup>, Л.А. Исаева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, <sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

**Аннотация.** Констатируется отсутствие в научной литературе единого взгляда на содержание понятия «имидж судоходной компании», а также методику корректной оценки имиджа судоходной компании. Одной из основных причин такой ситуации является игнорирование достижений кибернетической антропологии, которая рассматривает человека (в частности, покупателя) как высокоразвитого биоробота, функционирующего на основании определенных программ (причем, как врожденных, так и приобретенных в процессе жизни), а также психопрограммистики и ее прикладного направления – теории принятия решения о покупке в условиях рыночной конкуренции (эмоциональная теория продаж). Согласно эмоциональной теории продаж, на рынке в качестве объектов торговли выступают интегрированные продукты деятельности компании. Интегрированный продукт – это комплекс микропродуктов (основных и сопутствующих), которые связаны друг с другом устойчивыми ассоциативными связями. При этом под «основным микропродуктом» понимается микропродукт, связанный с удовлетворением основной потребности покупателя, а под «сопутствующим микропродуктом», – микропродукт, связанный с удовлетворением сопутствующей потребности. Согласно психопрограммистики, имидж судоходной компании – это эмоциональное отношение покупателя к совокупности интегрированных транспортных продуктов компании. В качестве ключевого показателя имиджа судоходной компании предлагается показатель относительной потребительской привлекательности усредненного интегрированного транспортного продукта данной судоходной компании. Речь идет об отношении потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта данной судоходной компании к потребительской привлекательности усредненных интегрированных продуктов компаний-конкурентов. При этом под потребительской привлекательностью интегрированного продукта понимается отношение его качества к цене. Разработана методика оценки имиджа малой судоходной компании, осуществляющей каботажные грузовые морские перевозки.

**Ключевые слова:** судоходная компания, имидж, психопрограммистика, методика оценки имиджа.

### Assessment of a shipping company image

Alexander A. Isaev<sup>1</sup>, Liudmila A. Isaeva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Vladivostok State University of Economics and Service, <sup>2</sup> Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

**Abstract.** There It is stated that the scientific literature does not have a single view on the content of the concept of “image of a shipping company”, as well as the methodology for correctly assessing the image of a shipping company. One of the main reasons for this situation is to ignore the achievements of cybernetic anthropology, which considers a person (in particular, a buyer) as a highly developed biorobot, functioning on the basis of certain programs (both congenital and acquired in the process of life), as well as psychoprogrammistics and its applied pattern - the theory of decision-making in buying in the conditions of market competition (emotional theory of sales). According to the emotional theory of sales, integrated products of the company’s activity are acting as objects of trade on the market. An integrated product is a complex of microproducts (basic and ancillary) that are linked together by stable associative links. At the same time, “basic microproduct” refers to microproduct related to meeting the basic needs of the buyer, and “ancillary microproduct” refers to a microproduct related to meeting the ancillary need. According to psychoprogramming, image of a shipping company is an emotional attitude of a buyer to the aggregate of integrated transport products of a company. An indicator of the relative consumer appeal of the average integrated transport product of this shipping company is proposed as a key indicator of the image of a shipping company. We are talking about the relation of consumer appeal of the average integrated product of this shipping company to the consumer appeal of the average integrated product of competing companies. At the same time, the consumer appeal of an integrated product is realized as the ratio of its quality to price. A methodology has been developed for assessing the image of a small shipping company engaged in coastal freight shipping.

**Keywords:** shipping company, image, psychoprogramming, image assessment technique.

#### Введение

Одним из факторов конкурентоспособности интегрированного транспортного продукта судоходной компании является имидж компании [2]. Однако до настоящего времени среди ученых и специалистов отсутствует единый взгляд на

содержание понятия «имидж судоходной компании», а также методику корректной оценки имиджа данной судоходной компании. Причем особенно актуальна эта проблема для малых судоходных компаний, осуществляющих каботажные грузовые морские перевозки.

По мнению авторов, основной причиной такой ситуации, является отсутствие общепризнанной теории, объясняющей природу психики человека (в частности, покупателя) с позиции современной науки. Не секрет, что сегодня во всем мире насчитываются десятки, если не сотни психологических школ, результаты исследований которых нередко противоречат друг другу.

Вместе с тем еще в середине XX века были сформированы основы новой науки – *кибернетической антропологии*, которая рассматривает человека как высокоразвитого робота, функционирующего на основании определенных программ (причем, как врожденных, так и приобретенных в процессе жизни). Основные идеи кибернетической антропологии были высказаны Н. Винером в работе «Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине» [10], а также Дж. Лилли в работе «Программирование и метапрограммирование человеческого биокомпьютера» [9].

В свою очередь кибернетическая антропология привела к возникновению такого направления глубинной психологии как *психопрограммистика* [5]. Речь о науке, содержанием которой являются врожденные программы, определяющие мышление и поведение человека как высокоразвитого робота. Причем с позиции психопрограммистики, элементарные программы человека напоминают компьютерные программы и включают в себя два элемента: 1) данные и 2) команда.

Психопрограммистика имеет ряд прикладных направлений. В частности, такое направление как теория принятия решения о покупке (эмоциональная теория продаж) [3; 4]. В последнем случае речь о теории, которая позволяет по-новому взглянуть на содержание такого понятия как «имидж компании») и предложить научно обоснованный метод оценки имиджа компании (например, судоходной).

### 1. Теория принятия решения о покупке

В основе теории принятия решения о покупке лежат пять законов.

1. Человек совершает те или иные действия (физические или ментальные) лишь в том случае, если они ведут к удовлетворению соответствующих потребностей.

2. Степень удовлетворения той или иной потребности неразрывно связана с возникновением у человека соответствующего чувства (эмоции).

С позиции кибернетической антропологии, *чувство* – это психический феномен, связанный с информацией о том, насколько удачно была выбрана данная модель поведения (мышления) с целью удовлетворения соответствующей потребности. А *эмоция* – психический феномен, связанный с информацией о том, какое чувство преваляло ранее при реализации данной модели поведения (мышления) [5].

Причем чувства (эмоции) могут быть, как позитивными, так и негативными.

3. Покупатель выбирает на рынке такой товар, потребление которого приведет к возникновению более сильных позитивных чувств (эмоций) в сравнении с товарами-конкурентами.

Таким образом, характер чувств (эмоций), которые возникнут у покупателя в результате

потребления данного товара, является мотиватором (или демотиватором) при выборе товаров на рынке. В частности, о том, что «эмоции образуют основную мотивационную систему» писал К. Е. Изард в «Эмоциях человека» [8].

4. Особенность программного обеспечения человека состоит в том, что на рынке покупатель выбирает так называемый *«интегрированный (комплексный) продукт деятельности производителя»*, который состоит из двух элементов: 1) *основной микропродукт* (например, собственно транспортная услуга) и 2) *сопутствующие микропродукты* деятельности производителя (например, рекламные продукты) [7].

Таким образом, на выбор покупателя оказывает влияние качество, как основного микропродукта, так и сопутствующих микропродуктов деятельности производителя.

5. Покупатель выбирает на рынке такой интегрированный продукт, который демонстрирует наилучшее соотношение качества и цены.

Дело в том, что выбирая тот или иной интегрированный продукт, покупатель запрограммирован на приобретение такого продукта, который позволит ему удовлетворить базовую двуединую потребность: приобрести продукт определенного качества по минимальной цене.

### 2. Содержание понятия «имидж компании»

На рынке существуют два основных вида товаров (предметов торговли): изделия и услуги. Особенность первых состоит в том, что они позволяют хотя бы в первом приближении оценить качество приобретаемых продуктов еще до их потребления. В отличие от изделий, качество услуг покупатель не может оценить до их потребления в принципе. В этой связи возникает проблема формирования позитивного отношения покупателя к результатам деятельности данного производителя.

Таким образом, с позиции глубинной психологии, *имидж компании (производителя)* – это эмоциональное отношение покупателя к интегрированным продуктам компании.

Причем следует учитывать, что речь может идти о «биографии» деятельности компании, как в целом, так и в частности. Например, когда речь идет об имидже компании в части ее деловой репутации.

### 3. Методика оценки имиджа малой судоходной компании, осуществляющей каботажные грузовые морские перевозки

По мнению авторов, ключевым показателем имиджа судоходной компании является *показатель относительной потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта данной судоходной компании*. По мнению авторов, ключевым показателем имиджа судоходной компании является *показатель относительной потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта данной судоходной компании*.

Речь идет об отношении потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта данной судоходной компании к потребительской привлекательности усредненных интегрированных продуктов компаний-конкурентов.



При этом под потребительской привлекательностью интегрированного продукта понимается соотношение качества и цены такого продукта. Чем выше показатель «качество/цена», тем более привлекательным для покупателя является данный интегрированный продукт.

Алгоритм оценки имиджа судоходной компании включает в себя четыре этапа (рис.).

*Этап первый.* Формирование перечня основных факторов имиджа судоходной компании [6].

Эмоциональное отношение покупателей к различным направлениям деятельности судоходной компаний имеет не только рациональную (например, среднее соотношение качества и цены торгового предложения), но и иррациональную природу (например, цвет рекламных материалов, фирменный стиль компании).

Основными факторами имиджа малой судоходной компании, осуществляющей каботажные грузовые морские перевозки, являются следующие.

1. Среднее качество собственно транспортных услуг.

2. Среднее качество складских услуг.

3. Среднее качество услуг персонала компании (услуги по приему и выполнению заказа на перевозку, услуги по обеспечению конфиденциальности, консультационные услуги).

4. Качество руководителя компании (профессионализм, доброжелательность, порядочность).

5. Качество выбора офиса компании (месторасположение, дизайн).

6. Качество бренда (название компании).

7. Качество сайта судоходной компании (оптимальность информации, дизайн, юзабилити).

8. Показатель «количество-качество» информационно-рекламных продуктов.

9. Показатель «количество-качество» PR-акций.

10. Показатель «количество-качество» наград компании.

11. Репутация компании при решении споров (положительная или отрицательная).

12. Качество правительственных и деловых связей (уровень правительственных связей, авторитетность деловых партнеров).

13. Известность компании (положительная или отрицательная).

14. Качество финансовой политики компании (финансовая устойчивость компании).

15. Цена торгового предложения.

*Этап второй.* Расчет показателя потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта данной судоходной компании.

Данный этап предусматривает расчет показателя потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта данной судоходной компании по формуле:  $ПППИП = ПК ИП / Ц$ , где ПППИП – показатель потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта данной судоходной компании, балл./руб.; ПК ИП – показатель качества усредненного интегрированного продукта данной судоходной компании, балл.; Ц – цена усредненного интегрированного продукта данной судоходной компании, руб.

При расчете показателя качества усредненного интегрированного транспортного продукта используется квалиметрический метод [1].

*Этап третий.* Расчет показателя потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта для каждой судоходной компаний-конкурента.

Данный этап предусматривает расчет показателя потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта судоходной компаний-конкурента по формуле:  $ПППИП_{кон} = ПК ИП_{кон} / Ц_{кон}$ , где ПППИП<sub>кон</sub> – показатель потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта данной судоходной компаний-конкурента, балл./руб.; ПК ИП<sub>кон</sub> – показатель качества усредненного интегрированного продукта данной судоходной компаний-конкурента, балл.; Ц<sub>кон</sub> – цена усредненного интегрированного продукта данной судоходной компаний-конкурента, руб.

*Четвертый этап.* Расчет показателя относительной потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта данной судоходной компании.

Данный этап предусматривает расчет показателя относительной потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта данной судоходной компании по формуле:

$ПОППИП = ПППИП / ПППИП_{кон макс}$ , где ПОППИП – показатель относительной потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта данной судоходной компании; ПППИП – показатель потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта данной судоходной компании; балл./руб.; ПППИП<sub>кон макс</sub> – максимальный показатель потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта среди судоходных компаний-конкурентов, балл./руб.

Таким образом, имидж данной судоходной компании будет привлекательным, если показатель потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта данной судоходной компании будет больше (или равен) показателя потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта судоходной компаний-конкурента, которая демонстрирует максимальную величину показателя потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта на данном рынке. То есть показатель относительной потребительской привлекательности усредненного интегрированного продукта данной судоходной компании будет больше (или равен) 1,0.

### Заключение

Особенность предложенного метода оценки имиджа судоходной компании состоит в том, что он опирается на регулярные опросы покупателей и тем самым позволяет зафиксировать уменьшение привлекательности имиджа (а с ним и показателя конкурентоспособности интегрированных продуктов) компании оперативно, в режиме on-line, не дожидаясь появления данных бухгалтерской отчетности. Причем предложенный метод оценки имиджа судоходной компании может быть использован различными компаниями (в частности, осуществляющими пассажирские морские перевозки).

### Литература

1. Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П. О квалиметрии. М.: Издательство стандартов, 1973. 172 с.
2. Исаев А.А., Исаева Л.А., Луговец А.А. Обеспечение конкурентоспособности морских перевозок: теоретический и методологический аспекты // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 4(38). Т.3. С. 139-143.
3. Исаев А.А. Продажи и эмоции. М.- Берлин: Директ-Медиа, 2017. 83 с.
4. Исаев А.А. Принятие решения о покупке: эмоциональный аспект // Практический маркетинг. 2015. № 5. С.3-6.
5. Исаев А.А. Психопрограммистика. М.- Берлин, 2019. 62 с.
6. Исаев А.А., Мегей Е.С., Лентарев А.А. Факторы конкурентоспособности каботажных грузовых морских перевозок // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 4 (38). Т. 3. С. 144-150.
7. Исаев А.А., Исаева Л.А., Сокуренок В.А. Формирование системы обеспечения конкурентоспособности продукции на предприятии. Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2018. 148 с.
8. Izard C.E. Human emotions. New York, Plenum Press, 1977.
9. Lilly J.C. Programming and Metaprogramming in the Human Biocomputer. Theory and Experiments. New York, Julian Press, 1967. 160 p.
10. Wiener N. Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine. New-York, Wiley and Sons, Inc. Paris: Hermann et cie, 1948.194 p.

### References

1. Azgaldov G.G., Raihman E.P. O kvalimetrii [About qualimetry]. Moscow: Izdatelstvo standartov, 1973. 172 s.
2. Isaev A.A., Isaeva A.A., Lugovets A.A. Obespechenie konkurentosposobnosti morskikh perevozok: teoreticheskiy i metodologicheskiy aspekti [Ensuring the competitiveness of sea shipping: theoretical and methodological aspects]. Marine intellectual technologies. 2017. № 4 (38). Vol.3. S.139-143.
3. Isaev A.A. Prodazhi i emotsii [Sales and emotions]. Moscow- Berlin: Direct-Media, 2017. 83 s.
4. Isaev A.A. Prinyatie resheniya o pokupke: emotsionalniy aspekt [Design to buy: emotion aspect]. Prakticheskiy marketing. 2015. № 5. S.3-6.
5. Isaev A.A. Psihoprogrammistika [Psyprogrammistics]. Moscow- Berlin: Direct-Media, 2019. 62 s.
6. Isaev A. A., Megey E. S., Lentarev A.A. Faktori konkurentosposobnosti kabotajnih gruzovih morskikh perevozok [Factors of competitiveness of coastal sea freight shipping]. Marine intellectual technologies. 2017. № 4 (38). Vol.3. S.144-150.
7. Isaev A.A., Isaeva L.A., Sokurenko V.A. Formirovanie sistemi obespecheniya konkurentosposobnosti produktsii na predpriyatii [Formation of a competitiveness system products at the enterprise]. Vladivostok: Izd-vo VGUES, 2018.148 s.
8. Izard C.E. Human emotions. New York, Plenum Press, 1977.
9. Lilly J.C. Programming and Metaprogramming in the Human Biocomputer. Theory and Experiments. New York, Julian Press, 1967. 160 p.
10. Wiener N. Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine. New-York, Wiley and Sons, Inc. Paris: Hermann et cie, 1948.194 p.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Александр Аркадьевич Исаев**, доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор кафедры международного маркетинга и торговли Владивостокского государственного университета экономики и сервиса, 690014, Владивосток, ул. Гоголя, 41, e-mail: isaevalex@list.ru

**Alexander A. Isaev**, Dr. Sci. (Econ), Ph.D. (Eng.), Professor of the Department of international marketing and trades, Vladivostok state university of economics and service, Gogolya, 41, Vladivostok, 69014, Russian Federation, e-mail: isaevalex@list.ru

**Людмила Алексеевна Исаева**, кандидат экономических наук, профессор, профессор кафедры экономической теории Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра 1, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, e-mail: isaevala@list.ru

**Liudmila A. Isaeva**, Ph.D. (Econ), Professor, Professor of the Department of the economic theory, Emperor Alexander I Petersburg state transport universite, Moskovskiy pr., 9, St. Petersburg, 190031, Russian Federation, e-mail: isaevala@list.ru

УДК 004.94+681.51  
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.017

## Экологическая безопасность при авариях на морской составляющей мультимодальной трубопроводной системы

Д.Ф. Кожевин<sup>2</sup>, А.С. Поляков<sup>2</sup>, Д.А. Скороходов<sup>1</sup>, В.Ю. Каминский<sup>1</sup>, А.Л. Стариченков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем транспорта имени Н.С. Соломенко Российской академии наук, <sup>2</sup>Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России, <sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

**Аннотация.** Для трубопроводов, проложенных под водой, опасными являются следующие факторы пожара: тепловое излучение при факельном горении природного газа над поверхностью моря, избыточное давление и импульс волны давления при сгорании газопаровоздушной смеси, а также расширяющиеся продукты сгорания при реализации пожара-вспышки газопаровоздушной смеси. При этом рассмотрены особенности газового конденсата и моноэтиленгликоля. Выполнена оценка пожарных рисков и составлен перечень исходных данных для их расчётов. Описана последовательность развития аварии. При построении дерева событий учтена глубина подводного размещения трубопровода. При проведении анализа риска использованы четыре сценария выхода природного газа на поверхность. Определена величина потенциального пожарного риска в определенной точке трассы трубопровода. Выполнена оценка воздействия поражающих факторов при авариях на шлангокабеле и на трубопроводе. Рассмотрены нестабильные динамические явления, сопровождающие аварию на морском трубопроводе: в начальный период воздействия ударной волны, выбросе воды на палубу судна и пожароопасного воздушного шлейфа над поверхностью моря.

**Ключевые слова:** фактор пожара, аварийная ситуация, продукты сгорания, пожароопасная смесь, дерево событий, сценарий, трубопровод.

## Environmental safety in case of accidents on the marine component of a multimodal pipeline system

Dmitriy F. Kozhevina<sup>2</sup>, Alexandr S. Polyakov<sup>2</sup>, Dmitriy A. Skorokhodov<sup>1</sup>, Valery Yu. Kaminsky<sup>1</sup>, Alexey L. Starichenkov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of science, <sup>2</sup>Saint-Petersburg University of State Fire Service of Russia, <sup>3</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University LETI

**Abstract.** For pipelines laid under water, the following fire factors are dangerous: thermal radiation when natural gas flares above the sea surface, excessive pressure and pressure wave momentum when a gas-air mixture is burned, as well as expanding combustion products when a gas-air mixture is flashed. Gorenje The features of gas condensate and monoethylene glycol are considered. Fire risks were assessed and a list of initial data for their calculations was compiled. The sequence of accident development is described. When building the event tree, the depth of the underwater pipeline placement is taken into account. During the risk analysis, four scenarios of natural gas coming to the surface were used. The value of the potential fire risk at a certain point of the pipeline route is determined. An assessment of the impact of damaging factors in accidents on the hose cable and on the pipeline was performed. Unstable dynamic phenomena accompanying an accident on an offshore pipeline are considered: during the initial period of impact of a shock wave, the release of water on the ship's deck and a fire-dangerous air plume above the sea surface.

**Keywords:** fire factor, emergency, combustion products, fire-hazardous mixture, event tree, scenario, pipeline.

### Введение

Месторождение газа может разрабатываться с помощью подводных морских добычных комплексов (ПМДК) без применения платформ [1,2]. Сооружения ПМДК включают следующие элементы и узлы, расположенные под водой:

- скважины;
- сборный манифольд;
- система морских внутримышловых трубопроводов (МВПТ), соединяющих эксплуатационные скважины и сборный манифольд;
- морские промысловые трубопроводы (МПТ), предназначенные для транспортировки продукции скважин от сборного манифольда на береговую установку комплексной подготовки газа (УКПГ).

Предполагается, что все технологическое оборудование будет работоспособным на глубине до 100 м. В этом случае в конструкции объектов подводного добычного комплекса (ПДК) предусмотрена защита от рыболовецких тралов и повреждения падающими предметами.

Внутри промыслового шлангокабеля размещаются трубопроводы подачи взрыво- и пожароопасных жидкостей [3]:

- подачи гидравлической жидкости (высокого и низкого давления) для управления работой технологического оборудования;
- подачи моноэтиленгликоля (одна линия) для предотвращения образования гидратов при эксплуатации.

Управление операциями перекачки нестабильного газового конденсата по многофазному трубопроводу осуществляется с помощью манифольдного устройства, располагаемого на дне моря (в районе куста скважин). Специальными техническими условиями (СТУ) на проектирование, строительство и эксплуатацию ПДК в границах проектирования предусмотрены следующие требования:

- подводный манифольд должен быть защищен от падающих предметов, воздействия якорей, якорных цепей, тралов и т.п.;
- вокруг подводных объектов должна устанавливаться зона безопасности радиусом не менее 500м;
- суда, выполняющие работы на ПДК, должны заходить в зону безопасности только для проведения конкретных работ;
- допускается транзит судов через зону безопасности, однако в ней запрещается постановка судна на якорь, лов рыбы и морепродуктов, а также другая хозяйственная деятельность.

### 1. Виды опасности

Перечислим опасные факторы пожара на подводных трубопроводах [4]:

- тепловое излучение при факельном горении природного газа над поверхностью моря, при пожарах пролива газоконденсата на поверхности моря в районе аварии;
- избыточное давление и импульс волны давления при сгорании газопаровоздушной смеси в открытом пространстве над морем в районе подводной аварии;
- расширяющиеся продукты сгорания при реализации пожара-вспышки газопаровоздушной смеси над морем в районе подводной аварии.

Очевидно, что для случая подводного газопровода, проложенного на глубинах порядка 100м, разлетом осколков, образующихся при взрывном разрушении элементов технологического оборудования, можно пренебречь.

Поражающие факторы аварий определяются физико-химическими свойствами газа, газового конденсата и жидкостей, содержащихся в трубопроводах шлангокабеля.

*Газовый конденсат* – природная смесь газообразных легкокипящих углеводородов, находящихся в недрах земли, распадающаяся на жидкую (конденсат) и газовую составляющие при охлаждении и снижении давления до атмосферного. Иными словами, газовый конденсат – это раствор газообразных углеводородов (до 75%) в жидких углеводородах (преобладают фракции с температурой кипения до 117<sup>0</sup>С). Иногда его называют газовым конденсатом ШФЛУ (широкая фракция легких углеводородов) или нестабильным газовым конденсатом. Именно такой продукт транспортируется по морскому подводному

многофазовому газопроводу. Из ШФЛУ после отделения газов (пропан-бутановых фракций) получается собственно газовый конденсат или стабильный конденсат, производство которого будет осуществляться береговыми установками УПГК.

*Гидравлическая жидкость* (Gastrol Brayco LV/3) обладает взрывопожароопасными свойствами (иные характеристики отсутствуют). При расчетах целесообразно ориентироваться на характеристики отечественного масла АМГ-10, широко применяемого в авиации при аналогичных условиях (давление 345-690 атм).

*Моноэтиленгликоль* (МЭГ), производимый в России, является горючей жидкостью с температурой вспышки 120<sup>0</sup>С и температурой самовоспламенения 380<sup>0</sup>С.

### 2. Основные сценарии поражающих факторов

Обобщенной характеристикой воздействия опасных факторов пожара (ОФП) на людей и материальные ценности является показатель пожарного риска. Пожарная безопасность объекта защиты считается обеспеченной, если пожарный риск не превышает допустимых значений, установленных Федеральным законом [5]:

- величина индивидуального пожарного риска в зданиях, сооружениях, строениях и на территориях производственных объектов не должна превышать одну миллионную в год;
- для производственных объектов, на которых обеспечение величины индивидуального пожарного риска одной миллионной в год невозможно в связи со спецификой функционирования технологических процессов, допускается увеличение индивидуального пожарного риска до одной десятичной в год. При этом должны быть предусмотрены обучение персонала действиям при пожаре и меры по социальной защите работников, компенсирующие их работу в условиях повышенного риска.

Представленные далее оценочные расчеты выполнены по следующим исходным данным:

- односторонний трубопровод диаметром 900мм для подачи скважинной продукции под пластовым давлением (максимальное расчетное давление на входе 9,6МПа, на выходе 9,3МПа);
- трубопровод диаметром 4дюйма для моноэтиленгликоля (проложен внутри шлангокабеля);
- четыре линии трубопроводов (диаметром по 0,5 дюйма каждая) для гидравлической жидкости (проложены внутри шлангокабеля).

Оценка воздействия поражающих факторов проведена по процедурам, предусмотренным методическими указаниями Газпрома [6] с учетом рекомендаций [7-11]. При этом частота утечек при разрыве трубопровода диаметром 900мм принята  $4,2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$ .



Рассмотрена возможность возникновения следующих пожароопасных аварийных ситуаций и пожаров в результате аварийного выхода газа на поверхность акватории месторождения:

Сценарий 1 (С<sub>1</sub>) – струйное горение природного газа.

Сценарий 4 (С<sub>4</sub>) – рассеяние облака, в расчет не принимался, поскольку не ведет к взрыву и пожару.

Сценарии рассмотрены для следующих характерных точек трубопровода:

- начальная точка (манифольдная площадка ПДК);
- на 14 км (середина подводного участка);
- конец подводного участка (250м от берега моря);
- граница проектирования подводного участка) трассы.

Развитие аварийных ситуаций в период эксплуатации происходит по следующим сценариям [12]:

- разрыв подводного трубопровода полного сечения, подводная ударная волна, образование газового пузыря и выход его на поверхность, истечение струй газа в воду, их дробление с образованием пузырьковой смеси, выход этой смеси на поверхность с образованием опасных для судоходства зон, рассеяние вышедшего газа в атмосфере;

- образование трещины в трубопроводе, раскрытие трещины до максимального размера, обеспечивающего её самоторможение, истечение газа в водную среду, дробление пузырей газа с образованием мелкодисперсной смеси, выход этой смеси на поверхность, рассеяние вышедшего газа в атмосфере;

- образование свища в трубопроводе, истечение газа в водную среду, дробление пузырей газа с образованием мелкодисперсной смеси, выход этой смеси на поверхность, рассеяние вышедшего газа в атмосфере.

В начальной стадии аварии, когда газ вытекает из разрыва в виде мощной звуковой струи, на поверхности воды должен наблюдаться интенсивный газовый выброс, обрамленный отдельными струями и брызгами, которые могут достигать высоты 50м и более. Длительность этой стадии составит 2÷2,5 мин, темп поступления газа в атмосферу остается примерно постоянным. После окончания стадии звукового истечения газовая струя все еще остается достаточно интенсивной, и, из-за относительно малой глубины, реализуется так называемый «режим мелкой воды». При этом на поверхности акватории должен наблюдаться газодынная султан высотой 5÷10м. На более поздних стадиях, когда образуется «пузырьковый шлейф», в месте аварии обнаруживается заметное возмущение свободной

Сценарий 2 (С<sub>2</sub>) – взрыв газозвушной смеси (ГВС).

Сценарий 3 (С<sub>3</sub>) – сгорание паровоздушной смеси без образования взрывной ударной волны («пожар - вспышка»).

поверхности воды с отдельными брызгами и выходом газа в виде достаточно крупных пузырей. Интенсивность данного «пузырькового шлейфа» уменьшается с течением времени. Процесс выхода газа прекращается спустя 3÷4 часа после момента начала аварии.

В стадии ярко выраженного струйного истечения практически во всех рассмотренных случаях время контакта воды с газовой фазой невелико. При этом в большинстве случаев массовая доля воды, контактирующей с газовой фазой, также оказывается небольшой. Отсюда следует, что заметное растворение газа в воде возможно лишь на относительно узкой периферии «газового ядра» струи или на самых последних стадиях процесса истечения газа, когда его расход мал. «Пузырьковый шлейф» формируется непосредственно у дна акватории, а время подъема вовлекаемой в «шлейф» воды достаточно велико. Однако и в этом случае насыщенная растворенным природным газом вода будет первоначально поступать в приповерхностный слой акватории, где, при контакте с атмосферой, будет возникать быстрая дегазация, поскольку концентрация газа в атмосфере практически равна нулю. Учтем также, что растворимость предельных углеводородов в воде крайне мала. После поступления в атмосферу, метан, удельный вес которого меньше удельного веса воздуха, будет быстро рассеиваться. Определенную опасность, по-видимому, может представлять лишь попадание в воздух более тяжелых предельных углеводородов (этана и т.д.), удельный вес которых больше удельного веса воздуха. Массовая доля их в перекачиваемом газе составляет около 5.5% .

При расчете вероятностей реализации сценариев аварийных ситуаций использован метод построения деревьев событий. Построение сценариев (С<sub>1</sub> – С<sub>3</sub>) возникновения и развития аварийных ситуаций проведено для оценки риска в случае полного разрушения трубопроводов. Это объясняется тем, что эквивалентный диаметр максимальных трещин в теле трубы не может превосходить 25мм. При возникновении трещины больше этого диаметра, она лавинообразно развивается до полного разрыва трубы.

Сценарии возникновения и развития пожароопасной ситуации на логическом дереве (рис.1) отражены в виде последовательности событий (от исходного до конечного события).

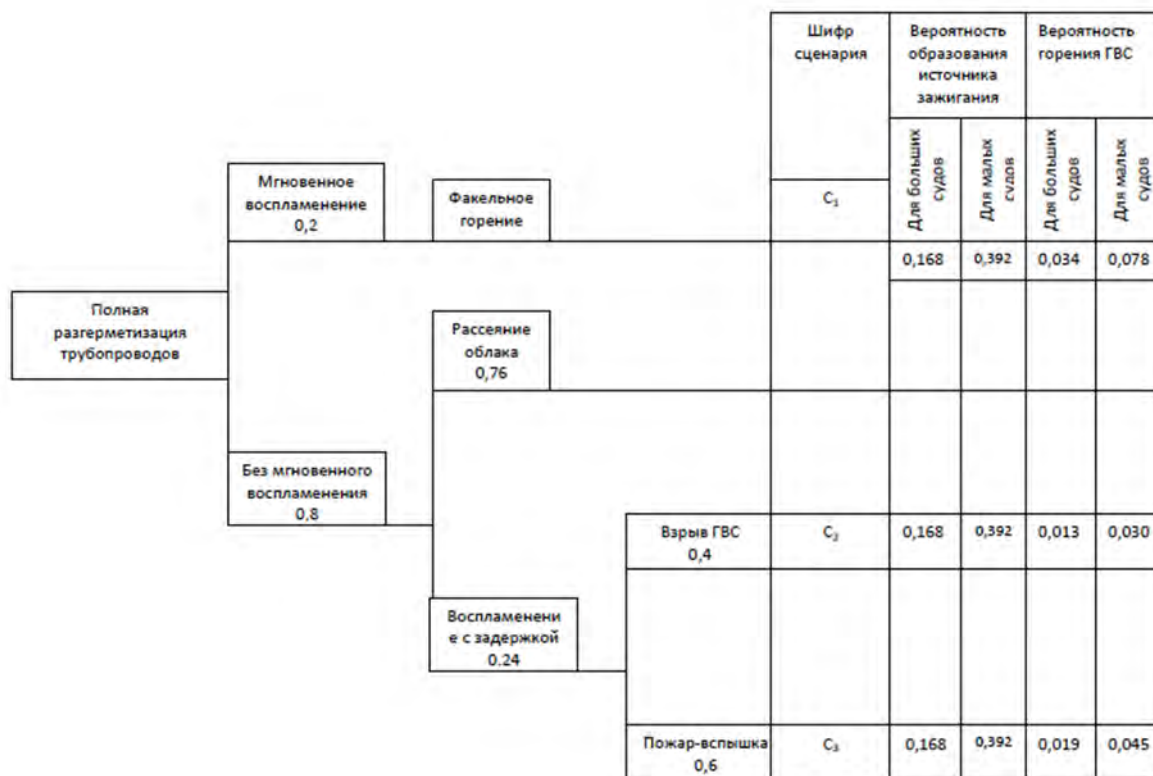


Рис. 1. Дерево развития событий при полной разгерметизации трубопровода и выходе газа через воду в атмосферу

При построении дерева развития событий учтена глубина подводного размещения трубопроводов. Согласно требованиям на проектирование, строительство и эксплуатацию ПДК, на подводном оборудовании с пластовой смесью высокого давления, находящемся на глубинах более 15м, при проведении анализа риска следует рассматривать следующие сценарии аварии [6]:

- разрыв трубопровода полного сечения с выбросом газа в воду;
- формирование шлейфа, поднимающегося к поверхности воды;
- выход газа на поверхность воды с формированием зоны пониженной плотности воды, пенного буруна и опасной зоны над поверхностью воды.

При проведении анализа риска следует учитывать следующие особенности:

- при разрыве заглубленного в дно трубопровода истечение газа будет заторможенным, с формированием поднимающегося шлейфа газа;
- - причиной воспламенения истекающего газа могут быть только суда, либо источники

воспламенения на берегу (самопроизвольное воспламенение выброса невозможно).

Сравнение сценариев развития неблагоприятных ситуаций при проектировании, строительстве и эксплуатации ПДК показывает, что во всех случаях может быть применена схема, представленная на рис.1.

Негативным событием является попадание судна с людьми в опасную зону, что может привести либо к утрате его плавучести либо к взрыву смеси (перекачиваемый продукт в смеси с воздухом). Если на месте аварии судна не оказывается, то выброс происходит без возникновения ущерба для реципиентов.

Частота каждого сценария развития пожароопасной ситуации рассчитывалась путем умножения частоты основного события на условную вероятность конечного события (с учетом длин участков трубопровода) и содержала вероятность наличия источника воспламенения на малых судах (у малых судов она выше, чем у больших). Результаты расчета вероятностей реализации выбранных сценариев представлены табл.1.

Таблица 1

Результаты расчета частот реализации выбранных сценариев при полной разгерметизации трубопровода

№ п/п	Место аварии	Частота сценария (1/год)		
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
1	Манифольдная площадка	14,4E-06	5,5E-06	8,3E-06
2	14 км трассы	14,4E-06	5,5E-06	8,3E-06
3	0,25 км от берега	14,4E-06	5,5E-06	8,3E-06

Показатели риска определены, исходя из интенсивности возникновения аварий, размера зон возможного поражения судов при возникновении аварии, вероятности поражения судна при попадании в опасную зону (в окрестности скважин и морских трубопроводов ПДК) и времени пребывания судов в этой зоне. Расчёты показали, что количество опасного вещества, вышедшего из трубопровода, определяется не величиной массового расхода истечения, а вместимостью трубопровода. Эти данные согласуются с результатами, полученными в работе [12]. Согласно им, полная масса выброса природного газа при аварии нитки трубопровода на подводном переходе слабо зависит от положения места разрыва. Она равна полной массе газа, находящейся в аварийном участке трубопровода. При этом полный выброс тяжелых углеводородов, плотность которых превышает плотность воздуха (этан, пропан, бутан), может составлять около 420т. Первые 50÷60% газа выделяются в течение первых 2-2,5мин с начала аварии, когда реализуется стадия мощного звукового истечения газа из разрыва трубопровода. Затем газ будет выделяться в виде менее мощной дозвуковой струи, интенсивность которой будет падать с течением времени. Длительность стадии подобного дозвукового истечения может составлять 3-4ч.

Величина потенциального пожарного риска  $P(a)$  в определенной точке трассы трубопровода ( $a$ ) определялась по формуле [13]:

$$P(a) = \sum_{j=1}^J Q_{aj}(a) \cdot Q_j,$$

где  $J$  – число сценариев развития пожароопасных ситуаций,  $Q_{aj}(a)$  – условная вероятность поражения человека в определенной точке трассы трубопровода ( $a$ ) в результате реализации  $j$ -го сценария развития пожароопасных ситуаций, отвечающего определенному, инициирующему аварию, событию,  $Q_j$  – частота реализации в течение года  $j$ -го сценария развития пожароопасных ситуаций, год<sup>-1</sup>.

Условная вероятность гибели человека, равная 1%, соответствует значению  $\Delta P_{\phi} = 69 \text{кПа}$ , а вероятность гибели 99% - значению  $\Delta P_{\phi} = 130 \text{кПа}$ .

При взрывах ГВС по сценарию  $S_2$ , указанные значения поражающих факторов на открытой местности не реализуются, поэтому гибель людей возможна только в области сгорающего облака ГВС как от избыточного давления, так и от теплового воздействия сгорающего облака. При оценке вероятности поражения, обусловленной взрывами и пожарами-вспышками, принято, что все аварии происходят в соответствующих точках на оси трассы трубопровода.

Величина индивидуального пожарного риска  $R_m$ , согласно [13], определяется перемножением вероятностей потенциального риска и вероятности пребывания человека в поле потенциального риска, которая определяется спецификой трудовой деятельности работников:

$$R_m = \sum_{i=1}^I q_{im} \cdot P(i),$$

где  $P(i)$  - величина потенциального риска в  $i$ -ой области территории объекта, год<sup>-1</sup>,  $q_{im}$  - вероятность присутствия работника  $m$  в  $i$ -ой области территории объекта.

Для категорий работников со сменным характером труда риск принимают пропорциональным времени пребывания в опасной зоне. Применительно к рассматриваемой задаче, учтены некоторые обстоятельства, влияющие на продолжительность пребывания в опасной зоне (вдоль трассы трубопровода).

1. Контроль технического состояния подводного участка трубопровода осуществляется автоматизированным измерительным комплексом (безлюдная технология).

2. При необходимости используются подводные аппараты, дистанционно управляемые оператором из безопасной зоны (безлюдная технология).

3. Визуальный осмотр трассы водолазами или проходом специального судна проводят не чаще одного раза в год или в два года, что определяется предприятием, осуществляющим контроль работоспособности.

Следовательно, в первых двух сценариях индивидуальный пожарный риск равен нулю. В третьем сценарии исходим из предположения, что для выборочного осмотра подводного участка трассы длиной 28км потребуется не более десяти дней. В этом случае вероятность пребывания составит не более  $10^{-3}$  (при восьмичасовом рабочем дне). Тогда, из приведенных данных следует, что для третьего сценария максимальное значение величины индивидуального пожарного риска составит:

$$R_m = \sum_{i=1}^I q_{im} \cdot P(i) =$$

$$= 10^{-3} \cdot 28,2 \cdot 10^{-6} \text{год}^{-1} = 0,28 \cdot 10^{-7} \text{год}^{-1}.$$

Полученное значение не превосходит законодательно установленных норм [5].

### 3. Оценка воздействия поражающих факторов при авариях на шлангокабеле трубопровода

При оценке последствий аварий на шлангокабеле учтено, что в его трубопроводах содержится не более  $300 \cdot 10^3 \text{кг}$  моноэтиленгликоля и около  $20 \cdot 10^3 \text{кг}$  гидравлической жидкости. Поэтому, в сравнении с аварией на трубопроводе (утечка газа около  $4 \cdot 10^6 \text{кг}$ ), негативные последствия аварий на шлангокабеле будут существенно меньше, поскольку они определяются величиной выделяемой энергии при взрыве и сгорании веществ и материалов. Поскольку при подаче этих жидкостей (помимо трубопроводов) используется насосное и резервуарное оборудование, оценка частоты реализации инициирующих пожароопасных событий выполнена применительно к истечению жидкости под давлением при полном разрушении резервуаров и аппаратуры. Согласно [13], частота реализации такого события составляет  $3,0 \cdot 10^{-7} \text{год}^{-1}$  на каждую из систем. Для пяти систем (одна - моноэтиленгликоль, четыре – гидравлическая жидкость) суммарная частота реализации аварийного сценария составит  $15 \cdot 10^{-7} \text{год}^{-1}$ .

Исходя из принятого предположения, что при осмотре трассы длиной 28км вероятность пребывания в ней работников составляет не более  $10^{-3}$  (при 8 часовом рабочем дне), следует ожидать

максимальную величину индивидуального пожарного риска равной:

$$R_m = \sum_{i=1}^I q_{im} \cdot P(i) = 10^{-3} \cdot 15 \cdot 10^{-7} \text{год} = 0,15 \cdot 10^{-8} \text{год}^{-1}.$$

Полученное значение не превосходит законодательно установленных норм [5]. Суммарное максимальное значение индивидуального пожарного риска (с учетом одновременной аварии на трубопроводе и шлангокабеле) составит:

$$R_m = \sum_{i=1}^I q_{im} \cdot P(i) =$$

$$= 0,28 \cdot 10^{-7} \text{год}^{-1} + 0,15 \cdot 10^{-8} \text{год}^{-1} = 0,30 \cdot 10^{-7} \text{год}^{-1}.$$

Таким образом, расчетное значение максимального индивидуального пожарного риска для работников, обслуживающих трассу трубопровода и шлангокабеля, менее нормируемой законом величины в одну миллионную в год [13,14].

#### 4. Нестабильные динамические явления, при аварии на морском трубопроводе в начальный период

К нестабильным динамическим явлениям относят воздействие ударной волны, выброс воды на палубу судна, снижение плотности морской воды в зоне выхода газа на поверхность моря и пожароопасный газоздушный шлейф над поверхностью моря, способный воспламениться от источников зажигания на судне.

##### 4.1 Воздействие ударной волны

Безопасное расстояние от воздействия ударной волны подводного взрыва для плавучих средств и гидротехнических сооружений оценивается по формуле [15, 16]:

$$L_6 = 25G^{0,5}H^{0,5},$$

где  $G$  – масса заряда взрывчатого вещества, кг,  $H$  – глубина погружения заряда, м.

Результаты расчета безопасных расстояний приведены в табл.2.

Таблица 2

Безопасные расстояния от воздействия ударной волны

Глубина в расчетной точке, м	Тритиловый эквивалент при разрыве, кг	Безопасное расстояние от действия ударной волны, м
10	27,97	41,81
14	27,83	35,25
40	27,63	20,78
20	27,34	29,23

Если судно находится ближе к месту разрыва газопровода, чем указано в табл.2, то возможно его повреждение ударной волной, выражающееся в деформациях и разрывах обшивки корпуса с последующим затоплением внутренних помещений. Возможна остановка механизмов и повреждение внутреннего оборудования от сотрясений. Вследствие относительно малой величины тритилового эквивалента и неконтактного характера воздействия ударной волны на суда, вероятность их быстрой гибели от данного поражающего фактора практически равна нулю. Речь идет именно о повреждениях. Малый радиус поражения ударной волной (30-40м) показывает, что вслед за первым ударным воздействием судно неизбежно подвергнется воздействию остальных, более мощных поражающих факторов. Воздействие ударной волны по своей силе значительно уступает остальным поражающим факторам.

Ударная волна воздействует в виде короткого импульса и не способна отбросить судно в сторону. Судно является как бы неподвижной деформируемой преградой. Отбрасывание судна в сторону происходит потоком воды, имеющим малую скорость, но на несколько порядков более длительное воздействие.

Сравнение безопасных расстояний с радиусами областей выхода газа на поверхность моря показывает, что воздействие ударной волны происходит в комплексе с поражающими факторами газо-водяного столба. Отсутствие в центре столба воды, замещенной струей газа в радиусе нескольких

десятков метров, позволяет предположить, что судно, имеющее размеры, сопоставимые с радиусом газовой струи, и оказавшееся над местом разрыва, погибнет, провалившись в воронку. Наличие источников зажигания на судне может привести к воспламенению выходящего газа.

При нахождении на минимальном безопасном, от ударной волны, расстоянии от места разрыва трубопровода судно избежит падения в воронку под действием радиальных потоков воды, отбрасывающих его в сторону от места аварии. Эти условия должны соответствовать размерам охранной зоны трубопровода (не менее 500м) и радиусу поражения судов от выброса газа (до 300м).

##### 4.2 Выброс воды на палубу судна

Поражающие факторы воздействуют комплексно и одновременно, за исключением действия краткого импульса ударной волны. Кроме того, по своему характеру их воздействие противоположно направлено. Падающая на палубу вода ослабляет основной поражающий фактор – воздействие восходящего потока. Также восходящему потоку противодействует и уменьшение плотности воды за счет присутствия пузырей газа. Следует учитывать не только и не столько вес падающей воды, сколько момент относительно центра площади начальной действующей ватерлинии.

При выбросе воды на палубу увеличивается вес судна, поэтому судно должно обладать запасом плавучести. Недопустимы перегрузы судна, это ведет к уменьшению величины надводного борта,



следовательно, к уменьшению запаса плавучести и остойчивости судна. Все входы и выходы, а также грузовые люки и другие отверстия надстроек и рубок, через которые вода может проникнуть внутрь корпуса, должны быть задрены и закрыты. Для этих целей все средства закрытия этих отверстий должны быть в наличии на борту судна и содержаться в исправном состоянии. Необходимо содержать все бортовые иллюминаторы в рабочем состоянии. В плохую погоду они должны быть надежно задрены.

#### **4.3 Снижение плотности морской воды в зоне выхода газа на поверхность моря**

В целом, на всех трех стадиях истечения газа из разрыва подводного трубопровода, насыщения воды газом практически не происходит, так как на поверхности воды осуществляется быстрая дегазация (растворимость предельных углеводородов в воде крайне мала). Воздействие истечения газа на окружающую среду в ходе первой и второй стадий процесса носит скоротечный характер, и практически не повлияет на плотность морской воды.

#### **4.4 Пожароопасный газо-воздушный шлейф над поверхностью моря**

На четвертой стадии («пузырьковый шлейф»), может наступить эффект объемного послойно-пространственного микроасслоения – когда газ, не растворяясь в воде, создает отдельную, от воды и газа субстанцию, типа «водно-газовый кипящий бульон», слабое подобие пены в струе шампанского, в которой образуются и действуют мириады альвеольно-капельных шариков-пузырьков с радиусом от микронов до миллиметров. Если бы глубина над местом разрыва была бы так велика, что действие восходящего потока не ощущалось, то тогда увеличение осадки судна могло бы привести к потоплению. Эти условия учтены в требованиях на проектирование, строительство и эксплуатацию ПДК размерами охранной зоны трубопровода (не менее 500м) и радиусом поражения судов от выброса газа - до 300м).

При утечках природного газа возможно образование взрывоопасного облака газо-воздушной смеси, которое может загореться при наличии источников зажигания. Для расчета последствий дефлаграционного взрыва газо-воздушной смеси применяют методики [12,13], утвержденные Ростехнадзором и Газпромом.

Воспламенение газо-воздушной смеси происходит лишь в том случае, когда облако горючего газа достигает источника воспламенения, обладающего достаточной энергией. В зоне морских трубопроводов источники воспламенения присутствуют на судах, находящихся в рассматриваемой зоне. Выбросы распространяются в вертикальном направлении, а шлейф движется по направлению ветра. Поэтому газовые шлейфы распространяются над поверхностью моря на большие расстояния.

Для исследования были выбраны следующие значения расстояний [11,17,18]:

- расстояние, достигаемое облаком горючего газа на высоте 10м, что характерно для небольших судов;

- расстояние, достигаемое облаком горючего газа на высоте 25м, что характерно для судов большего размера.

Наличие на судне работающей дизельной установки может привести к воспламенению природного газа. Вероятность воспламенения на судне, идущем по курсу, определяется средней плотностью движения судов, и условной вероятностью отложенного воспламенения от судна, находящегося в данной зоне. Вероятность воспламенения в течение одной минуты для больших и малых судов принимается равной 0,5 и 0,2 соответственно [17,18].

#### **Заключение**

Проведена классификация аварийных ситуаций в период эксплуатации подводных морских добычных комплексов, транспортирующих пластовую смесь высокого давления.

Выявлены факторы пожара и поражающие факторы аварий, которые определяются физико-химическими свойствами газа, газового конденсата и жидкостей, содержащихся в трубопроводах шлангокабеля.

При оценке вероятностей реализации аварийных сценариев использован метод построения дерева событий.

В ходе оценки риска постулировалась следующая цепочка событий:

- разрыв трубопровода полного сечения с выбросом газа в воду;
- формирование пузырькового шлейфа, поднимающегося на поверхность;
- выход газа на поверхность с формированием зоны пониженной плотности, пенного буруна и опасной зоны над водной поверхностью.

Механизм моделируемых процессов, сопровождающих аварию, имеет следующие особенности:

- при разрыве заглубленного в дно трубопровода истечение газа будет тормозиться формированием поднимающегося шлейфа газа;
- причиной воспламенения истекающего газа могут быть либо суда, либо береговые источники воспламенения (самопроизвольное воспламенение выброса невозможно).

Установлено, что максимальная величина индивидуального пожарного риска для работников, обслуживающих трассу трубопровода и шлангокабеля, менее законодательно установленного значения.

В рамках исследования показано, что ударная волна воздействует на объект в виде короткого импульса и не способна переместить судно, которое представляется неподвижной деформируемой преградой. Перемещение судна осуществляется потоком воды с малой скоростью, но с длительным воздействием.

В процессе истечения газа из разрыва подводного трубопровода вода, практически, не насыщается газом, поскольку растворимость предельных углеводородов в воде незначительна, а на поверхности происходит быстрая дегазация.

Наличие на судне работающей дизельной установки может привести к воспламенению природного газа. Вероятность воспламенения на

судне, идущем по курсу, определяется средней вероятностью отложенного воспламенения от судна, плотностью движения судов, и условной находящегося в данной зоне.

#### Литература

1. Технические требования ООО «Газпром добыча шельф» на проектирование «Обустройство Киринского ГКМ», 2011.
2. Шавыкин А.А., Матишов Г.Г., Жигульский В.А. ОВОС проекта транспортировки газа со Штокмановского месторождения до завода СПГ в губе Ура // НефтьГазПромышленность. 2006. № 2(22). С. 28–31.
3. Сводный отчет по оценке риска. Морские трубопроводы и кабели. Проект Сахалин 2 Этап 2. 5025-E-90-04-T-7002-00. Saipem UK Ltd, 2004.
4. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник в 2-х томах.- М.: Пожнаука, 2004 - 1487с.
5. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 № 123-ФЗ (последняя редакция).
6. СТО Газпром 2-2.3-351-2009. Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром».
7. ГОСТ 27.310-95 Надежность в технике (ССНТ). Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения.
8. ГОСТ Р 51901.1-2002 Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем (с Поправкой).
9. ГОСТ Р 51901.5-2005 (МЭК 60300-3-1:2003) Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности (с Поправкой).
10. ГОСТ Р 51901.13-2005 (МЭК 61025:1990) Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей.
11. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (в ред. Приказа МЧС России от 14.12.2010 № 649).
12. Муру Н.П. Статика корабля. – Л.: ВВМИОЛУ, 1969 - 526 с.
13. Муру Н.П. Прикладные задачи плавучести и остойчивости судна. - Л.: Судостроение, 1985 – 215 с.
14. 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. 2018. С. 93-99.
15. TNO «Purple book» (CPR18E) «Guidelines for Quantitative Risk Assessment». Организация прикладных научных исследований, Фиолетовая книга (CPR 18E). Методические рекомендации по проведению количественной оценки риска. Комитет по предупреждению катастроф, 1999.
16. Моделирование газодинамических явлений и распространения газа в морской среде при аварийном разрушении газопровода. ВЦ им. Дородницына А.А. РАН, 2006.
17. Скороходов Д.А., Стариченков А.Л., Каминский В.Ю. Комплексная оценка технического состояния магистрального газопровода. – Бельцы: Lap Lambert, 2017- 65 с.
18. Каминский В.Ю., Скороходов Д.А., Козьмовский Д.В. Комплексная оценка безопасности линейной части магистрального газопровода // В сборнике: «Транспорт России: проблемы и перспективы – 2017» материалы Международной научно-практической конференции. 2017. С. 322-327.

#### References

1. Tekhnicheskie trebovaniya ООО «Gazprom dobycha shelf» na proektirovanie Obustrojstvo Kirinskogo GKM [Technical requirements of Gazprom dobycha shelf LLC for the design Of the Kirinsky gas station]. 2011.
2. SHavykin A.A., Matishov G.G., ZHigul'skij V.A. OVOS proekta transportirovki gaza so SHtokmanovskogo mestorozhdeniya do zavoda SPG v gube Ura [EIA of the gas transportation project from the Shtokman field to the LNG plant in Guba Ura] // Neft'GazPromyshlennost'. 2006. № 2(22). pp. 28–31.
3. Svodnyj otchet po ocenke riska. Morskie truboprovody i kabeli. Proekt Sahalin 2 Etap 2 [Summary report on risk assessment. The offshore pipelines and cables. Sakhalin 2 Project Stage 2] 5025-E-90-04-T-7002-00. Saipem UK Ltd. 2004.
4. Korol'chenko A.YA., Korol'chenko D.A. Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov i sredstva ih tusheniya [Fire and explosion hazard of substances and materials and means of extinguishing them]. Spravochnik v 2-h tomah. M. Pozhnauka. 2004. 1487p.
5. Federal'nyj zakon «Tekhnicheskij reglament o trebovaniyah pozharnoj bezopasnosti» [Technical regulations on fire safety requirements] ot 22.07.2008 № 123-FZ (poslednyaya redakciya).
6. STO Gazprom 2-2.3-351-2009. Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu analiza riska dlya opasnyh proizvodstvennyh ob"ektov gazotransportnyh predpriyatij ОАО «Газпром» [Guidelines for conducting risk analysis for hazardous production facilities of Gazprom gas transport companies].
7. GOST 27.310-95 Nadezhnost' v tekhnike (SSNT). Analiz vidov, posledstvij i kritichnosti otkazov. Osnovnye polozheniya [Reliability in technology (SSNT). Analysis of the types, consequences, and criticality of failures. Fundamentals].
8. GOST R 51901.1-2002 Menedzhment riska. Analiz riska tekhnologicheskikh sistem [Risk management. Risk analysis of technological systems] (s Popravkoj).
9. GOST R 51901.5-2005 (MEK 60300-3-1:2003) Menedzhment riska. Rukovodstvo po primeneniyu metodov analiza nadezhnosti [Risk management. Guidelines for applying reliability analysis methods] (s Popravkoj).
10. GOST R 51901.13-2005 (MEK 61025:1990) Menedzhment riska. Analiz dereva neispravnostej [Risk management. Fault tree analysis].

11. Metodika opredeleniya raschetnyh velichin pozharnogo riska na proizvodstvennyh ob'ektah [Method for determining the calculated values of fire risk at production facilities] (v red. Prikaza MCHS Rossii ot 14.12.2010 № 649).
12. Muru N.P. Statika korablya [Ship statics]. L. VVMIOU. 1969. 526 p.
13. Muru N.P. Prikladnye zadachi plavuchesti i ostoichivosti sudna [Applied problems of ship buoyancy and stability]. L. Sudostroenie. 1985. 215 p.
14. Kaminsky V.YU., Skorohodov D.A., Korolyov O.A. Informacionnaya sistema podderzhki prinyatiya resheniya pri bor'be za zhivuchest' sudna // V sbornike: «Tekhnologii postroeniya kognitivnyh transportnyh sistem» materialy Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2018. pp. 93-99.
15. TNO «Purple book» (CPR18E) «Guidelines for Quantitative Risk Assessment». Organizaciya prikladnyh nauchnyh issledovanij, Fioletovaya kniga (CPR 18E). Metodicheskie rekomendacii po provedeniyu kolichestvennoj ocenki riska [Guidelines for conducting quantitative risk assessment]. Komitet po preduprezhdeniyu katastrof. 1999.
16. Modelirovanie gazodinamicheskikh yavlenij i rasprostraneniya gaza v morskoy srede pri avarijnom razrushenii gazoprovoda [Modeling of gas dynamic phenomena and gas propagation in the marine environment in the event of an emergency failure of a gas pipeline]. VC im. Dorodnicyna A.A. RAN. 2006.
17. Skorohodov D.A., Starichenkov A.L., Kaminsky V.YU. Kompleksnaya ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya magistral'nogo gazoprovoda [Comprehensive assessment of the technical condition of the main gas pipeline]. Bel'cy. Lap Lambert. 2017. 65 p.
18. Kaminsky V.YU., Skorohodov D.A., Koz'movskij D.V. Kompleksnaya ocenka bezopasnosti linejnoy chasti magistral'nogo gazoprovoda // V sbornike: «Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2017» materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2017. pp. 322-327.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Дмитрий Федорович Кожевин**, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149 e-mail: yagmort\_kdf@mail.ru

**Александр Степанович Поляков**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физико-технических основ обеспечения пожарной безопасности Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, 149, e-mail: poljakov\_as@mail.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; профессор кафедры, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, e-mail: skorohodda@mail.ru

**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, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

**Алексей Леонидович Стариченков**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, alstar72@yandex.ru

**Dmitriy F. Kozhev**, Ph.D. (Eng), associate professor, Head of the Physical and Chemical Bases of the Burning and Extinguishing Processes Department, Saint-Petersburg university of State fire service Emercom of Russia Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: yagmort\_kdf@mail.ru

**Aleksandr S. Polyakov**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor of Physical and Technical Bases of Fire Safety Department, Saint-Petersburg university of State fire service Emercom of Russia, 149, Moskovskiy Avenue, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: poljakov\_as@mail.ru

**Dmitriy A. Skorokhodov**, professor, Dr. Sci. (Eng), Chief researcher, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; Professor of Department, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, Professor Popov str., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: skorohodda@mail.ru

**Valery Yu. Kaminsky**, senior lecturer, Ph.D. (Eng), Head of the laboratory, Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian academy of science 13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: Kaminskyvy@yandex.ru

**Alexey L. Starichenkov**, senior lecturer, Dr. Sci. (Eng), Head of department, Saint Petersburg Electrotechnical University LETI, 5, Professor Popov str., Saint-Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: alstar72@yandex.ru

УДК 681.3.07  
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.018

## Управление инвестиционной деятельностью и ростом объемов производства кораблестроительных компаний в сфере маломерного судостроения

Т.Г. Айгунов<sup>1</sup>, В.Б. Мелехин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Дагестанский государственный технический университет,

<sup>2</sup>Дагестанский государственный университет народного хозяйства

**Аннотация.** Решаются проблемы связанные с организацией оптимальной инвестиционной деятельности и развитием кораблестроительных компаний за счет производства хозяйственным способом маломерной кораблестроительной продукции. Рассмотрена методика расчета необходимых инвестиционных средств для экстенсивного развития потенциальных возможностей компании, позволяющих обеспечить рост объемов производства различного вида маломерных судов с учетом неудовлетворенного на них рыночного спроса. Предложена методика оценки объемов производства различного вида маломерных судов, позволяющих кораблестроительной компании получать максимально возможную прибыль. Определено условие, выполнение которого позволяет кораблестроительной компании установить такие объемы производства различных видов маломерной кораблестроительной продукции, которые обеспечивают ей рентабельную производственную деятельность. Разработаны инструментальные средства, открывающие перед кораблестроительной компанией возможности определять оптимальные объемы производства различных видов продукции и проводить гибкую ценовую политику в условиях дефицита инвестиционных средств и на этой основе обеспечить эффективную производственную деятельность.

**Ключевые слова:** кораблестроительная компания, объемы производства, маломерные суда, продукция, инвестиционные средства, объемы производства, рентабельность.

## Management of investment activities and the growth of shipbuilding companies in the field of small shipbuilding

Timur G. Aygumov<sup>1</sup>, Vladimir B. Melekhin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Dagestan State Technical University, Russian Federation

<sup>2</sup>Dagestan State University of National Economy, Russian Federation

**Abstract:** The problems associated with the organization of optimal investment activity and the development of shipbuilding companies through the economic production of small shipbuilding products are being resolved. The paper discusses the methodology for calculating the necessary investment funds for the extensive development of the company's potential capabilities, allowing to ensure the growth of production volumes of various types of small vessels taking into account unsatisfied market demand for them. A technique is proposed for estimating the production volumes of various types of small vessels, allowing the shipbuilding company to receive the maximum possible profit. A condition has been determined whose fulfillment allows the shipbuilding company to establish such volumes of production of various types of small-sized shipbuilding products that provide it with cost-effective production activities. Tools have been developed that open up opportunities for the shipbuilding company to determine the optimal production volumes of various types of products and pursue a flexible pricing policy in the conditions of a shortage of investment funds and, on this basis, ensure efficient production activities.

**Key words:** shipbuilding company, production volumes, small vessels, products, investment funds, production volumes, profitability.

### Введение

В связи с развитием водного туризма в нашей стране наблюдается повышенный спрос на различные виды маломерных судов (катера, яхты, лодки) [1]. В этой сфере следует отметить, следующие, в основном, Петербургские предприятия производящие данный вид кораблестроительной продукции:

– в секторе надувных лодок компании «Лидер», «Фрегат», «Мнев и Ко» на долю которых приходится 90% отечественной продукции;

– на рынке стеклопластиковых судов фирмы «Стрингер», «Курс», «Флинт» и алюминиевых корпусов – «Спортсудпром», «Адмиралтейские верфи»;

– в строительстве яхт компания «Компан – Марин», и др.

Однако, отечественные частные компании из-за ограниченных производственных мощностей, отсутствия отечественных материалов требуемого

качества и нехватки квалифицированной рабочей силы, удовлетворяют только на 20% – 30% рыночный спрос на различные виды маломерных судов. Кроме того, недостаточно изученными остаются вопросы обоснования рентабельности маломерного судостроения [2], особенно в сфере яхтостроения, что снижает инвестиционную активность в данной производственной сфере. В то время как, например, экспорт продукции яхтостроения польских верфей в ЕС ежегодно составляет 70 млрд. евро.

К одному из путей решения данной проблемы на фоне высокого неудовлетворенного спроса следует отнести широкое привлечение крупных отечественных кораблестроительных компаний (КК) для производства маломерных судов. Например, АО «Адмиралтейские верфи», как побочный продукт (0,5% от общего оборота), производит ежегодно по 500 – 600 алюминиевых катеров «Мастер» и получает на этой основе дополнительную прибыль, отправляя данную продукцию на экспорт.



Однако обеспечение вновь создаваемых в КК производственных мощностей необходимыми для развития инвестициями, в настоящее время является достаточно проблематичным, хотя объемы инвестирования в последние годы в целом по стране достаточно интенсивно росли. Это связано с тем, что данный рост пришелся, в основном, на сферу добычи полезных ископаемых, в частности сырой нефти и газа, а также предприятий связанных с переработкой нефтепродуктов [3], которые фактически имеют достаточно большие объемы собственных средств для эффективного развития, образующиеся за счет получаемой прибыли. Кроме того, для основной массы производственных предприятий различных отраслей национальной экономики, особенно вновь создаваемых, получить долгосрочные кредиты на приемлемых условиях также является достаточно проблематичным [4].

Таким образом, перед российскими производителями в реальном секторе экономики, в том числе и крупными КК, встает актуальная проблема поиска возможностей получения дополнительной прибыли и эффективного использования, имеющихся у них как собственных, так и заемных средств, которые они могут вложить в дальнейшее развитие. В этой связи возникает необходимость в обосновании инвестиционной привлекательности маломерного судостроения на крупных отечественных КК для привлечения как зарубежных, так и отечественных частных инвестиций в целях его дальнейшего развития. Одному из эффективных подходов решения данной проблемы и посвящается настоящая работа.

### 1. Оценка инвестиционных средств эффективного развития

Как отмечено выше, к одному из эффективных путей использования крупными КК собственных и заемных инвестиционных средств, следует отнести производство маломерных судов пользующихся сегодня в стране высоким спросом на рынке. Это обусловлено малыми сроками их строительства, а, следовательно, и достаточно быстрой оборачиваемостью инвестиционных средств.

Рассмотрим случай, когда все внутрипроизводственные резервы КК, позволяющие, помимо государственного заказа, производить хозяйственным способом различные виды маломерных судов, исчерпаны, а в экономической среде (ЭС) сложились благоприятные условия, позволяющие им увеличить объемы производства экстенсивным путем за счет дальнейшего развития своих потенциальных возможностей. Для решения данной задачи, в первую очередь, необходимо определить требуемые для этого инвестиции ( $C$ ), которые могут обеспечить покрытие следующих основных расходов, связанных с расширенным воспроизводством объемов производимой продукции на величину, равную, например, неудовлетворенному рыночному спросу  $W_{HC}$  [5]:

– дополнительные затраты ( $\Delta C_{TP}$ ), связанные с развитием трудовых ресурсов отдельной КК (заработная плата вновь нанятых рабочих и технологов плюс затраты на подготовку и переподготовку специалистов):

$$\Delta C_{TP} = \sum_{j=1}^m \Delta T_{jP} \Delta C_{jTP},$$

где  $\Delta T_{jP}$  – число единиц требуемого прироста трудовых ресурсов  $j$  профессии, например, технологов, операторов технологического оборудования и т.д.;  $\Delta C_{jTP}$  – затраты, связанные с приростом трудовых ресурсов  $j$  назначения на одну условную единицу производимой продукции; – затраты ( $\Delta Z_{OF}$ ), необходимые для модернизации и развития основных фондов КК экстенсивным путем:

$$\Delta Z_{OF} = \sum_{i=1}^n K_{iOF} \Delta C_{iOF},$$

где  $K_{iOF}$  – требуемое количество единиц технологического оборудования или оснастки  $i$  вида;  $\Delta C_{iOF}$  – затраты, связанные с внедрением в производственный процесс одной условной единицы основных фондов  $i$  вида, например, одной единицы технологической оснастки или матрицы по которой делаются корпуса судов и т.п.;

– издержки ( $\Delta И_{ПР}$ ), вызванные приростом объемов производства, (например, расходы, связанные с закупкой дополнительного сырья, оплатой дополнительных энергетических ресурсов и т.д.) на величину, равную  $W_{KHC}$ :

$$\Delta И_{ПР} = \sum_{k=1}^m W_{kHC} \Delta C_{kПР},$$

где  $\Delta C_{kПР}$  – издержки, связанные с приростом объемов производства продукции  $k$  вида на одну условную единицу затрат;  $m$  – общее количество единиц маломерных судов  $k$  вида, определяющее суммарный прирост объемов производства;

– затраты  $\Delta Z_T$  связанные с приобретением и разработкой современных производственных технологий и оснастки, например, расходы на решение остро стоящей проблемы отечественного маломерного судостроения связанной с изготовлением корпусов маломерных судов с требуемым обводом.

Отсюда, основные инвестиционные затраты  $C_3$ , необходимые для расширенного воспроизводства производственной деятельности КК путем запланированного роста объемов производства продукции в объемах, равных  $W_{HC}$ , будут определяться следующим образом:

$$C_3 = \Delta C_{TP} + \Delta C_{OF} + \Delta И_{ПР} + \Delta Z_T + П_3,$$

$П_3$  – прочие затраты.

При наличии у КК собственных средств ( $C_{CP}$ ) на развитие и выполнении условия  $C_{CP} < C_3$  ему требуются заемные средства ( $Z_{CP}$ ), в объеме равном:

$Z_{CP} = C_3 - C_{CP}$ . При отсутствии же у КК собственных средств  $Z_{CP} = \Delta C_3$ .

Что же касается дорогостоящих маломерных и малотоннажных судов, например, рыболовческих судов и яхт бизнес класса, то КК в этом случае целесообразно провести глубокие маркетинговые

исследования спроса на данный вид продукции на внутреннем и внешнем рынке. После этого, выполнив расчеты основных затрат связанных с подготовкой производства данного вида продукции и объемы возможной прибыли, оценить целесообразность внедрения их производственный процесс за счет собственных и заемных средств. Затем, приступить к строительству таких судов на договорной основе, по цене позволяющей покрыть все издержки производства и получить запланированную прибыль с учетом имеющегося на рынке неудовлетворенного спроса.

## 2. Оптимальное планирование роста объемов производства

Рассмотрим основные случаи определяющиеся наличием у КК различных возможностей роста объемов производства в соответствии со сложившимися в экономической среде условиями.

1. Допустим, что КК в соответствии с принятым планом развития может увеличить объемы производства  $j, j=1, 2, \dots, z$  видов маломерных судов пользующихся на рынке высоким спросом. Пусть в результате реализации одной условной единицы произведенной продукции  $j$  наименования и выплаты различных обязательных платежей, она получает прибыль, равную  $\Delta \Pi_j$ . Тогда общая прибыль ( $\Pi$ ) КК, получаемая в результате реализации дополнительно произведенных маломерных судов различного вида в объемах, равных неудовлетворенному спросу  $W_{jHC}$  за один период времени оборачиваемости ( $T_{OB}$ ) вложенных в развитие средств  $\Delta C_{j3}$ , будет определяться следующим образом [ 6 ]:

$$\Pi = \sum_{j=1}^z W_{jHC} \Delta \Pi_j. (1)$$

Для того чтобы КК работала рентабельно и могла вернуть вкладываемые в развитие заемные средства  $Z_{CP}$ , плюс связанные с ними банковские проценты  $\Delta Z_{CP}$  требуется выполнение следующих условий:

а) в случае, когда  $T_{OB} = T_B$  необходимо, чтобы:

$$\Pi > \sum_{j=1}^z (Z_{jCP} + \Delta Z_{jCP}), (2)$$

где  $T_B$  - установленный банком срок возврата заемных средств.

Отсюда, согласно (1) и (2) для рентабельной работы КК, при отсутствии собственных средств на развитие, необходимо спланировать такой прирост  $\Delta W_{jOK}$  объемов для каждого  $j$  вида маломерных судов, при которых выполняется условие:

$$\Delta W_{jOK} > \frac{Z_{jCP} + \Delta Z_{jCP}}{\Pi_j}, (3)$$

С учетом следующих ограничений  $\Delta W_{jOK} \leq W_{jHC}$ ,

где  $\Pi_j$  – прибыль, которую может получить КК при реализации на рынке  $j$  вида судов в количестве, равном  $\Delta W_{jOK}$

б) в случае, когда  $T_{OB} < T_B$ , определение количества периодов  $k$  ( $k = T_{OB} / T_B$ )

оборачиваемости вкладываемых в развитие средств  $Z_{jOK} + \Delta Z_{jOK}$  за период времени, равный  $T_B$ , соотношение (3) можно записать следующим образом:

$$\Delta W_{jOK} > k \frac{Z_{jCP} + \Delta Z_{jCP}}{\Pi_j},$$

при следующих ограничениях:  $\Delta W_{jOK} \leq W_{jHC}$ .

2. Допустим КК планирует свое развитие за счет расширения ассортимента производимых маломерных судов путем ввода дополнительных производственных мощностей и использования имеющихся резервов с сохранением общих объемов производства  $W_{OK}$  ранее изготавливаемой продукции. В этом случае, при планировании объемов производства  $W_j, j=1, 2, \dots, d$  для каждого  $j$  нового вида маломерных судов, следует исходить из ограничений на объемы имеющихся инвестиций  $I_{3}$ . С этой целью следует получить сбалансированное соотношение между их объемами и получаемой КК прибылью  $\Pi_j$  в результате реализации на рынке различных судов  $j$  наименования в количестве, равном  $W_j$ . Другими словами, для рентабельной работы КК необходимо, чтобы для получаемой ею прибыли  $\Pi_j$ , как минимум, выполнялось условие (3). К одному из эффективных подходов решения этой задачи следует отнести планирование таких объемов производства различных видов маломерных судов  $j$  вида, при которых выполняется условие равновесия спроса и предложения и устанавливается соответствующая ему цена  $\Delta C_j$  на одно судно. В этом случае, в производство целесообразно внедрять только такие виды маломерных судов, для которых выполняется условие (3).

Практика показывает, что производственные предприятия, как правило, сталкиваются с наличием ограниченных объемов имеющихся у них собственных инвестиционных средств  $I_{3}$  [7]. В этой связи при внедрении в производство различных видов маломерной судостроительной продукции с различным уровнем ее рентабельности, ограниченных объемов неудовлетворенного спроса и имеющихся инвестиций возникает необходимость в решении следующей оптимизационной задачи.

Пусть КК способна производить  $d$  видов маломерных судов, т.е.  $j=1, 2, \dots, d$ , имеющих, соответственно, объемы неудовлетворенного спроса, равные  $W_{jHC}$ . Допустим, что при условии равновесия спроса и предложения для одного судна  $j$  вида на рынке устанавливается цена, равная  $\Delta C_{Pj}$ , а затраты КК на производство и реализацию одного маломерного судна  $j$  вида равны  $\Delta Z_j$ . Тогда получаемая КК общая прибыль  $\Pi$  при внедрении в производство всех  $d$  видов маломерных судов при наличии необходимых для этого инвестиций  $I_{3}$ , будет определяться следующим образом:

$$\Pi = \sum_{j=1}^d W_{jHC} (\Delta C_{Pj} - \Delta Z_j).$$

Однако, в случае, когда имеет место неравенство:

$$I_3 < \sum_{j=1}^d W_{jHC} \Delta Z_j, \text{ возникает необходимость в}$$

распределении имеющихся инвестиций между различными видами производимых маломерных судов таким образом, чтобы КК могла получить максимально возможную прибыль. Другими словами, ограниченные инвестиционные средства необходимо распределить между различными видами внедряемых в производство маломерных судов таким образом, чтобы достигался максимум получаемой прибыли:

$$\Pi = \sum_{i=1}^n W_j^* (\Delta C_j - \Delta Z_j) \rightarrow \max,$$

при выполнении следующего условия

$$I_3 = \sum_{j=1}^d W_j^* \Delta Z_j \text{ и ограничений на объемы}$$

производимой продукции  $W_j^* \leq W_{jHC}$ , где  $\Delta C_j$  - рыночная цена одного маломерного судна  $j$  вида при объемах производства, равных  $W_j^*$ , которые в результате оптимизации могут и не удовлетворять условию равновесия спроса и предложения.

Полагая, что рыночная цена  $\Delta C_j$  на суда  $j$  вида будет увеличиваться пропорционально имеющемуся на рынке их дефициту, т.е. при условии, что  $W_j^* \leq W_{jHC}$ , то можно записать:

$$\Delta C_j = C_{jP} \frac{W_{jHC}}{W_j^*}.$$

Эффективным образом решить приведенную выше оптимизационную задачу можно используя предложенную в [8] методику решения задач условной оптимизации. Для этого на первом этапе все виды маломерных судов, которые способны производить КК хозяйственным способом ранжируются в порядке снижения их прибыльности. Затем, с учетом имеющихся инвестиций планируются объемы производства различного вида маломерных судов, начиная с продукции, приносящей максимальную прибыль. Если после расчета затрат требующихся для производства наиболее рентабельной продукции на первом шаге у КК остаются средства, то они используются для определения объемов производства второго по рентабельности вида маломерных судов и т.д. до распределения всех имеющихся инвестиций.

Следует отметить, что в случае, когда КК функционирует в нестабильной инвестиционной среде, объемы производства целесообразно определять на основе методов адаптивного планирования [9].

Рассмотрим случай, когда имеющиеся у КК инвестиции превышают средства необходимые для покрытия неудовлетворенного спроса по всем видам внедряемых в производство маломерных судов, т.е. выполняется условие:

$$I_3 > \sum_{j=1}^d W_{jHC} \Delta Z_j.$$

В этом случае у КК возникают инвестиционные резервы, которые она может использовать:

- для увеличения производства ранее производимой продукции, в объемах равных неудовлетворенному на нее рыночному спросу, если такой имеется на рынке;

- для увеличения объемов производства ранее производимой продукции при отсутствии на нее неудовлетворенного спроса, снизив до приемлемого значения ее стоимость, что может обеспечить прирост получаемой прибыли за счет роста объемов реализации.

Допустим КК планирует прирост объемов ранее производимой продукции  $j$  вида при отсутствии на нее неудовлетворенного спроса, на количество, равное  $\Delta W_j$  в соответствии с имеющимися у нее инвестициями. Тогда условие определения допустимого прироста их объемов, сопровождающегося снижением рыночной цены одной условной единицы до допустимой величины, равной  $\Delta C_j^*$ , т.е. цены, при которой ее производство остается рентабельным, можно записать следующим образом:

$$(W_{jP} + \Delta W_j)(\Delta C_j^* - \Delta Z_j) > > W_{jP}(\Delta C_{Pj} - \Delta Z_j). \quad (4)$$

Необходимым, но не достаточным условием выполнения соотношения (4) является следующее неравенство:  $\Delta C_j^* > \Delta Z_j$ .

После выполнения простых преобразований (4) получим:

$$(\Delta C_{Pj} - \Delta C_j^*)W_{jHC} < \Delta W_j(\Delta C_j^* - \Delta C_{Pj}).$$

Отсюда следует, что:

$$\frac{\Delta W_j}{W_{jP}} > \frac{\Delta C_{Pj} - \Delta C_j^*}{\Delta C_j^* - \Delta Z_j}, \quad (5)$$

Для определения эффективной для КК рыночной цены  $\Delta C_j^*$  одного маломерного судна  $j$  вида при нарушении условия равновесия спроса и предложения при фиксированном приросте  $\Delta W_j$  объемов производства, найденном исходя из имеющихся в наличии инвестиций, используем следующий итерационный процесс:

$$\Delta C_j^*(i+1) = \Delta C_j^*(i) - \Delta C_i, \quad i = 1, m,$$

приняв на первом его шаге цену  $\Delta C_j^*(i=1)$ ,

равную его цене  $\Delta C_{Pj}$  при равновесии спроса и

предложения. Приращение цены  $\Delta C_i$  на каждом шаге можно определить с помощью следующего соотношения:

$$\Delta C_i = \frac{\Delta C_{Pj}}{\Delta C_j^*(i)}.$$

После определения на каждом  $i$  шаге цены  $\Delta C_j^*(i)$

, она подставляется в соотношение (5) и проверяется условие его выполнения. Если условие (5) не выполняется, то за минимально допустимую цену реализации одного маломерного судна  $j$  вида при

приросте объемов производства на величину, равную  $\Delta W_j$ , принимается цена, равная  $\Delta \Pi_j^*(i-1)$ , т.е. цена, полученная на последнем шаге процесса ее поиска, на котором выполнялось условие (5). В противном случае, итерационный процесс поиска минимально допустимой цены продукции продолжается до тех пор, пока условие (5) становится невыполнимым. Полученная таким образом цена производимой продукции позволяет КК получить дополнительную прибыль за счет роста объемов ее реализации.

3. Третий случай, когда КК внедряет в производство новые виды маломерных судов, сводится ко второму случаю, при условии, что у нее имеются дополнительные средства для свертывания производства ранее производимой продукции, потерявшей рентабельность, например, из-за падения на нее спроса. Другими словами, в данном случае необходимые для развития инвестиционные средства  $I_3$  определяются следующим образом:

$$I_3 = Z_{CB} + \sum_{j=1}^n (Z_{jTP} + Z_{jOF} + \Delta I_{jPP}),$$

где  $Z_{CB}$  – затраты, необходимые для свертывания производства нерентабельной продукции, потерявшей свою конкурентоспособность на рынке, которые в дальнейшем должны быть покрыты из прибыли, получаемой КК в результате реализации нового вида маломерных судов;

$Z_{jTP}, Z_{jOF}$  – затраты, соответственно, связанные с развитием трудовых ресурсов и основных производственных фондов, необходимых для организации производства маломерных судов  $j$  вида;

$\Delta I_{jPP}$  – издержки, связанные с производством  $j$  вида маломерных судов, на первом этапе оборачиваемости вкладываемых в развитие средств. Резюмируя вышеизложенное, руководство КК может использовать следующую общую методику оценки целесообразности внедрения в производство маломерного судостроения.

- Провести маркетинговые исследования, позволяющие для каждого вида маломерных судов определить: объемы неудовлетворенного

рыночного спроса; среднюю рыночную стоимость одного судна.

- Определить затраты связанные с подготовкой производства для каждого вида маломерных судов.
- Рассчитать себестоимость производства одного судна различного вида с учетом объемов неудовлетворенного спроса.
- Вычислить прибыль, которую КК может получить в результате производства каждого вида маломерных судов в объеме равном неудовлетворенному спросу.
- Оценить имеющиеся в наличии собственные средства и требующиеся заемные средства, которые КК может привлечь в виде банковских кредитов.
- Определить наиболее рентабельные виды маломерного судостроения с учетом сроков оборачиваемости и возврата требующихся для их производства заемных средств.
- Рассчитать прибыль, которую может получить КК, внедряя в производство наиболее рентабельные виды продукции

### Заключение

1. Использование руководством КК предложенных в работе методов оценки и оптимизации объемов производства различного вида маломерных судов в изменяющихся условиях ЭС, позволяет обеспечить эффективное развитие и получение максимально возможной прибыли с учетом изменения рыночного спроса на ранее производимую продукцию и внедряемые в производство новые виды маломерной кораблестроительной продукции.
2. Предложенный подход позволяет КК установить целесообразность внедрения в производство различных видов маломерных судов хозяйственным способом и на этой основе обеспечить себе получение дополнительной прибыли для решения социально-экономических проблем.
3. Предложенная методика оценки рентабельности производства маломерного судостроения позволяет потенциальным инвесторам оценить эффективность вложения инвестиционных средств в данную сферу развития КК. Это, в свою очередь, способствует дополнительному притоку инвестиций в отечественную кораблестроительную отрасль.

### Литература

1. Жуков П.В., Морозова О.Н., Шкурпат С.Г. Современные проблемы и тенденции развития водного туризма в Санкт – Петербурге // Сервис plus. 2018. Т.12. № 2. С. 14 – 23.
2. Киселев А.А. Повышение конкурентоспособности российского судостроения: ревизия моделей и стратегия модернизации. М.: ИНФРА-М, 2014. 240 с.
3. Россия в цифрах. 2019: Крат. стат. сб. М., изд. «Росстат», 2019. 549 с.
4. Макаров В.Ю. Рынок кредитования сегодня: проблемы, противоречия и потенциал роста // Известия Саратовского университета. Сер. Экономика. Управление. Право, 2016. Т. 16. Вып. 2. С. 144 – 148.
5. Курбанова И.И., Гаджиев И.Ц. Оценка и оптимизация объемов производства продукции и оказываемых услуг в процессе развития малых предприятий // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2014. Т.33, № 2. С. 96 – 103.
6. Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Оптимальное управление развитием машиностроительных предприятий // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. 2019. № 8. С. 43 – 50. DOI:10/25751/pribor 08/2019/826.
7. Балабанов И.Т. Финансовый анализ и планирование хозяйствующего субъекта. М., изд. «Финансы и статистика», 2002. 208 с.



8. Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Инструментальные средства автоматизированного управления устойчивостью производственно-финансовой деятельности машиностроительных объединений // *Фундаментальные исследования*. 2019. № 7. С. 75 – 85.
9. Айгумов Т.Г., Мелехин В.Б. Модели и интеллектуальные инструментальные средства адаптивного планирования экономического роста производственных систем // *Морские интеллектуальные технологии*. 2020. Т. 1. № 1. С. 171 – 175. DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.032.

#### References

1. Zhukov, P.V., Morozova, O.N. Shkuropat S.G. *Sovremennyy'e problemy` i tendenczii razvitiya vodnogo turizma v Sankt – Peterburge* [Modern problems and development trends of water tourism in St. Petersburg]. *Service plus* [Service plus]. 2018, 12 (2), 14 – 23.
2. Kiselev, A.A. *Povyshenie konkurentosposobnosti rossijskogo sudostroeniya: reviziya modelej i strategiya modernizacii* [Improving the competitiveness of Russian shipbuilding: model revision and modernization strategy]. Moscow: INFRA-M. 2014, 240 p
3. *Rossiya v cifrah. 2019: Krat. stat. sb.* [Russia in numbers. 2019: Brief statistical compilation]. M., izd., «Rosstat», 2019, 549 p.
4. Makarov, V. Yu. *Rynok kreditovaniya segodnya: problemy, protivorechiya i potencial rosta* [The lending market today: problems, contradictions and growth potential]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Ser. Ekonomika. Upravlenie. Pravo* [News of the Saratov University. Ser. Economy. Control. Right]. 2016, 16(2), 144 – 148.
5. Kurbanova, I. I., Gadzhiev, I. C. *Ocenka i optimizaciya ob'emov proizvodstva produkcii i okazyvaemyh uslug v processe razvitiya malyh predpriyatij* [Assessment and optimization of production volumes and services provided in the process of development of small enterprises]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2014, 33(2), 96 – 103.
6. Melekhin, V.B., Hachumov, V.M. *Optimal'noe upravlenie razvitiem mashinostroitel'nyh predpriyatij* [Optimal management of the development of engineering enterprises]. *Pribory i sistemy. Upravlenie. Kontrol'. Diagnostika* [Devices and systems. Control. The control. Diagnostics]. 2019, 19(8), 43 – 50. DOI:10/25751/pribor 08/ 2019/826
7. Balabanov, I.T. *Finansovyj analiz i planirovanie hozyajstvuyushchego sub"ekta* [Financial analysis and planning of an economic entity]. M., izd., «Finansy i statistika», 2002, 208 s.
8. Melekhin, V.B., Hachumov, V.M. 2019. *Instrumental'nye sredstva avtomatizirovannogo upravleniya ustojchivost'yu proizvodstvenno-finansovoj deyatel'nosti mashinostroitel'nyh ob"edinenij* [Instruments for automated management of the sustainability of production and financial activities of engineering associations]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Basic research]. 2019, 19(7), 75 – 85.
9. Aygumov, T.G., Melekhin, V.B. *Modeli i intellektual'nye instrumental'nye sredstva adaptivnogo planirovaniya ekonomicheskogo rosta proizvodstvennyh sistem* [Models and intelligent tools for adaptive planning for economic growth production systems]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii* [Marine intellectual technologies]. 2020. 1 (1), 171 – 175. DOI 10.37220/MIT.2020.47.1.032.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Тимур Гаджиевич Айгумов**, кандидат экономических наук, заведующий кафедрой программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», Российская Федерация, 367015, Республика Дагестан, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70. Email: 915533@mail.ru

**Timur G. Aygumov**, Ph.D. (Econ), Head of the Department of Computer Software and Automated Systems, Dagestan State Technical University, Russian Federation, 367015, Republic of Dagestan, Makhachkala, Imam Shamil, Ave,70. Email: 915533@mail.ru

**Владимир Борисович Мелехин**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет»; профессор кафедры прикладной математики и информационных систем ГАОУ ВО «Дагестанский государственный университет народного хозяйства». Российская Федерация, 367008, Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Атаева, 5. Email: pashka1602@rambler.ru

**Vladimir B. Melekhin**, Dr. Sci. (Eng), Professor, Professor of the Department of Computer Software and Automated Systems, Dagestan State Technical University, Professor, Department of Applied Mathematics and Information Systems, Dagestan State University of National Economy, Russian Federation, 367008, Republic of Dagestan, Makhachkala, ul. Ataev, 5. Email: pashka1602@rambler.ru

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

УДК 371.693.4  
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.019

### Компьютерный тренажер управления движением судна на подводных крыльях

А.Л. Стариченков<sup>1</sup>, Е.А. Стариченкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет

**Аннотация.** В современных высших гражданских и военных учебных заведениях при изучении систем управления и навигации используются тренажеры, построенные по следующему принципу: промышленный пульт управления (система управления), устанавливаемый на отечественных судовых системах, соединяется со схемой или устройством, моделирующим поведение объекта управления. Такие тренажеры зачастую дороги, сложны в изготовлении, обслуживании и наладке. При современном уровне развития вычислительной техники в обучении различным технологическим навыкам и умениям все чаще используются программы-тренажеры, с достаточно большой точностью моделирующие как систему управления, так и объект управления. В статье предлагается программный тренажер, позволяющий моделировать различные режимы движения судна на подводных крыльях, включая аварийные режимы движения, посредством отображения на дисплее компьютера пульта управления движением судна на подводных крыльях с возможностью изменения заданных значений кинематических параметров. В рассматриваемом тренажере предусмотрена возможность отображения процесса движения судна в продольной и поперечной плоскостях, а также графиков изменения во времени соответствующих параметров состояния судна. Приводятся видеокдры представленной программной оболочки. Обсуждаются преимущества использования предложенного программного продукта в качестве тренажера для обучения судоводителей. В статье представлен один из возможных вариантов программного обеспечения для тренажера управления движением судна на подводных крыльях. Для создания тренажера в данной работе была выбрана система «Бирюза 2», предназначенная для установки на пассажирских судах на подводных крыльях «Циклон», «Альбатрос» и «Колхида» для повышения их маневренных и мореходных качеств.

**Ключевые слова:** судно на подводных крыльях, тренажер, программное обеспечение, система управления движением, видеокдр

### Computer simulator for motion control hydrofoil vessels

Alexey L. Starichenkov<sup>1</sup>, Elizaveta A. Starichenkova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg state Electrotechnical University "LETI", <sup>2</sup>St. Petersburg state University

**Abstract.** In modern higher civil and military educational institutions, when studying control and navigation systems, simulators are used based on the following principle: an industrial control panel (control system) installed on domestic ship systems is connected to a circuit or device that simulates the behavior of the control object. Such simulators are often expensive, difficult to manufacture, maintain and set up. At the current level of development of computer technology, training in various technological skills and abilities is increasingly used simulator programs that simulate both the control system and the control object with a fairly high accuracy. The article offers a software simulator that allows you to simulate various modes of movement of a hydrofoil vessel, including emergency modes of movement, by displaying a computer control panel for the movement of a hydrofoil vessel with the ability to change the set values of kinematic parameters. In this simulator, it is possible to display the process of ship movement in the longitudinal and transverse planes, as well as graphs of changes in time of the corresponding parameters of the ship's condition. Video frames of the presented software shell are provided. The advantages of using the proposed software product as a simulator for training skippers are discussed. The article presents one of the possible software options for the hydrofoil motion control simulator. To create a simulator, the system «Biryuz 2» was selected in this work. It is intended for installation on passenger hydrofoils «Cyclone», «Albatros» and «Kolhida» to improve their maneuverability and seaworthiness.

**Keywords:** hydrofoils, simulator, software, motion control system, screenshot

#### Введение

Цель работы – создание программного обеспечения (ПО) тренажера, предназначенного для моделирования процесса управления движением судна на подводных крыльях (СПК). Разрабатываемое ПО в дальнейшем предполагается использовать в качестве тренажера для обучения судоводителей. Была поставлена задача исследовать математическую модель и структуру системы управления СПК и по результатам этого

исследования создать ПО, позволяющее моделировать различные режимы движения СПК, включая аварийные режимы движения [1, 8], посредством отображения на дисплее компьютера пульта управления движением СПК с возможностью изменения заданных значений кинематических параметров. Программное обеспечение должно отображать процесс движения судна в продольной и поперечной плоскостях, а также графики изменения во времени соответствующих параметров состояния рассматриваемого объекта.

### 1. Математическая модель движения СПК

При проектировании систем управления для судов на подводных крыльях и составлении математической модели движения необходимо учитывать их специфические особенности, как объекта управления [4-7, 9]:

- сложный нелинейный характер гидродинамических процессов, протекающих на многочисленных элементах крыльевого комплекса СПК, движущегося в условиях развитого морского волнения;
- пространственный характер движения СПК в отличие от других надводных судов;
- наличие жестких ограничений на фазовые координаты СПК, связанных с недопустимостью как ударов корпуса о водную поверхность, так и выхода несущих крыльев из воды;
- недопустимость линеаризации гидродинамических характеристик, а следовательно, и уравнений динамики в целом при наличии интенсивных волновых возмущений, когда высота волн сравнима или превышает длину стоек СПК;
- наличие большого числа управляющих органов, многие из которых оказывают воздействие сразу на несколько управляемых координат;
- специфика использования в качестве сил поддержания судна подъемных сил крыльев, движущихся вблизи границы раздела двух сред.

### 2. Состав и структура параметров, выносимых на пульт управления движением СПК

Пульт системы управления движением «Бирюза 2» представляет собой совокупность приборов, средств управления и сигнализации о режимах работы и неисправностях. Приборная доска пульта разделена на четыре части: управление креном, дифферентом и рулем направления, управление курсом, закрылками и системой.

В верхней части пульта расположены сигнальные и информационные светодиоды, информирующие о режиме работы системы и неисправностях.

Панель управления системой расположена в нижней части пульта. Панель управления креном и дифферентом включает в себя вольтметры «Крен» и «Дифферент», отображающие текущее значение этих параметров; вольтметр «Руль направл.», отображающий угол перекладки руля направления. Кроме того, на панели расположены ручки принудительного задания крена и дифферента. Центральная панель пульта – панель управления курсом, на которой рас положен курсоуказатель, ручка «Установка шкал», предназначенная для согласования шкал при включении пульта управления, ручка «Курс заданный», с помощью которой устанавливается новый заданный курс судна.

Панель управления закрылками расположена в правой части пульта. На ней находятся вольтметры, отображающие угол отклонения носового и кормовых закрылков. Рядом с вольтметрами расположены ручки задания угла отклонения соответствующего закрылка, работающие в режиме «Система» при отключенном режиме стопорения закрылков. В верхней части панели находятся светодиоды, сигнализирующие о стопорении каждого из трех закрылков.

### 3. Программная реализация тренажера

Программа написана на языке *Borland Delphi* и предназначена для выполнения в операционной системе *Microsoft Windows*. Программа представляет собой выполняемый *EXE* файл, запускаемый в операционной системе. Элементы интерфейса программы являются стандартными для системы *Windows* и не требуют от пользователя дополнительных навыков и знаний.

В программном тренажере [2] предусмотрено моделирование различных аварийных ситуаций, возникающих по независимым от оператора причинам, а именно:

- неисправность руля направления (мигающий красный светодиод «Неисправность РН»);
- перегорание светодиодов на передней панели;
- отсутствие напряжения в сети (220 В, 27 В);
- отсутствие реакции технических средств на управляющее воздействие (стрелки приборов крена, дифферента, руля направления резко уходят до упора вправо).

Кроме того, предусмотрена отработка реакции системы на возможные типичные ошибки оператора, такие как:

- не произведено согласование шкалы;
- перед согласованием шкалы штурвал не установлен в центральное положение;
- производится попытка управления закрылками, креном и дифферентом в режиме «Курс».

При запуске программы открывается главное окно тренажера (рис. 1). Основную часть окна занимает изображение пульта управления. Для поворота регулировочной ручки (или диска) установки курса требуется навести курсор на ее (его) изображение и нажать левую или правую клавишу «мыши» для поворота против или по часовой стрелке соответственно.

Для переключения тумблера требуется навести на него курсор и нажать на левую клавишу «мыши». При этом тумблер переключится в противоположное состояние.

В левой верхней части окна расположен главный таймер, который с шагом в 1 секунду производит отсчет времени работы тренажера. При загрузке программы тренажер первоначально находится в выключенном состоянии. Для его включения используется кнопка «Пуск». Кнопка «Стоп» производит остановку работы тренажера. Кнопка «Обнуление» сбрасывает таймеры и обнуляет все переменные системы. Кнопка «Руль в центр» используется для обозначения пользователем действия по центровке руля направления, необходимой перед произведением согласования шкал.

Под таймером находятся изображения схематичных проекций судна [3], относительно которых строятся линия поверхности воды, направления заданного курса и генерального распространения волн.

В нижней части окна выводятся две информационные строки. В верхней строке представлена информация о режиме работы тренажера, в нижней – сообщения об ошибках, допущенных пользователем при управлении СПК.

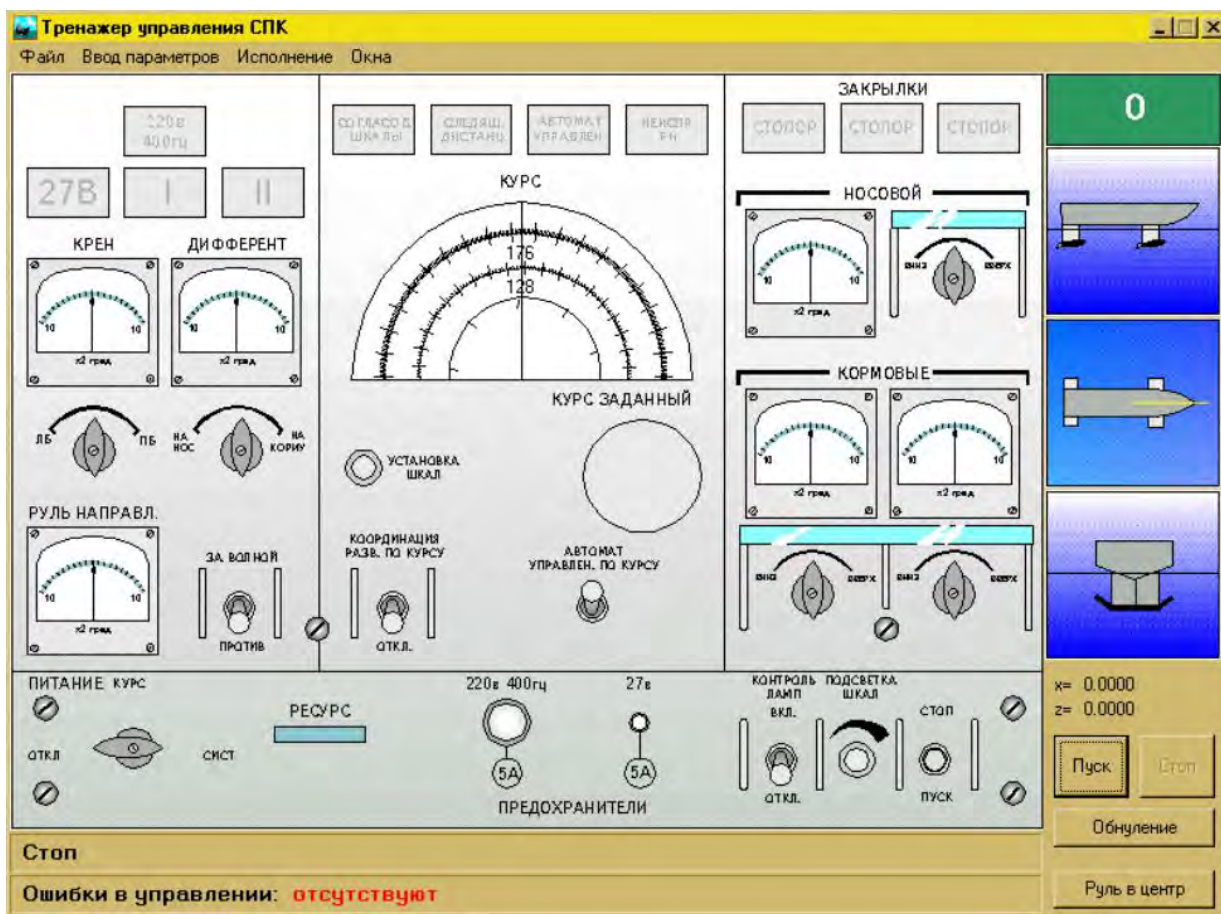


Рис. 1. Главное окно тренажера

Пользовательское меню главного окна позволяет управлять работой тренажера, вызывать окна индикации параметров математической модели и окна настройки тренажера.

Запуск тренажера невозможен без ввода параметров судна, волнения и гидродинамических зависимостей. Поэтому при первом запуске программы эти окна автоматически открываются поверх главного окна.

Окно ввода параметров судна (рис. 2) используется для ввода геометрических и физических параметров моделируемого судна. После ввода параметров окно можно закрыть – при этом сами параметры останутся в оперативной памяти, не обнуляются при повторном открытии окна и используются в процессе моделирования.

Для сохранения параметров в файл и чтения их из файла имеются кнопки «Сохранить в файл», «Загрузить из файла». При этом используются стандартные окна «Save as» и «Open» операционной системы Windows. Файл сохраняется в текстовом формате, где все параметры записываются в той

последовательности, в какой они представлены на экране, каждый параметр на новой строке.

Кнопка «Очистить все» предназначена для обнуления значений всех параметров.

В окне ввода параметров внешних возмущений устанавливаются параметры гармоник при моделировании волновых возмущений. В программе используется полигармоническое волнение, строящееся на основе четырех гармоник. В окне вводятся параметры гармоник: частота в герцах, амплитуда в метрах, начальная фаза в градусах.

Окно ввода гидродинамических зависимостей предназначено для численного задания зависимостей сил и моментов на различных элементах крыльевой схемы в зависимости от заглибления и угла.

Окно ввода параметров тренажера служит для ввода частоты выполнения различных действий, например, шага интегрирования; частоты вывода параметров в окно вывода параметров; частоты построения следующей точки графика; частоты обновления изображений стрелок на приборах и положения водной поверхности на проекциях судна.



Рис. 2. Окно ввода параметров судна

В окне вывода графиков переходных процессов (рис. 3) во время работы тренажера постоянно строятся графики зависимости крена, дифферента, высоты центра тяжести, текущего и установленного курса от времени. Границы вывода зависимостей по оси ординат соответствуют максимальному и минимальному значениям, которые за все время сеанса работы с тренажером принимала отображаемая величина. Когда графики доходят до края поля по оси абсцисс, они автоматически продолжают строиться на следующей странице. Для перемещения между страницами используются клавиши «Предыдущая страница» и «Следующая страница». Клавиша «Очистить» удаляет все страницы и очищает все координатные плоскости.

Окно вывода текущих значений параметров предназначено для вывода значений параметров и переменных, входящих в математическую модель СПК. Шаг отображения параметров устанавливается

в окне настроек тренажера. Все углы выводятся в градусах, расстояние и высота в метрах, сила в килоньютонах. Кнопка «Сохранить в файл» позволяет сохранить таблицу в текстовый файл для дальнейшего анализа или печати.

Кнопка «Очистка» удаляет все данные из таблицы. В данном окне выводятся следующие параметры: значения дифферента, высоты центра тяжести, крена и курса и их первые производные, установленный курс, вертикальные, горизонтальные и боковые силы, действующие на каждое крыло, аргументы гидродинамических сил для каждого крыла, параметры волнения.

Окно протокола работы предназначено для вывода протокола действий совершаемых пользователем по запуску и остановке тренажера, сообщений об аварийных ситуациях, об ошибках пользователя. Каждое сообщение сопровождается указанием времени его наступления.

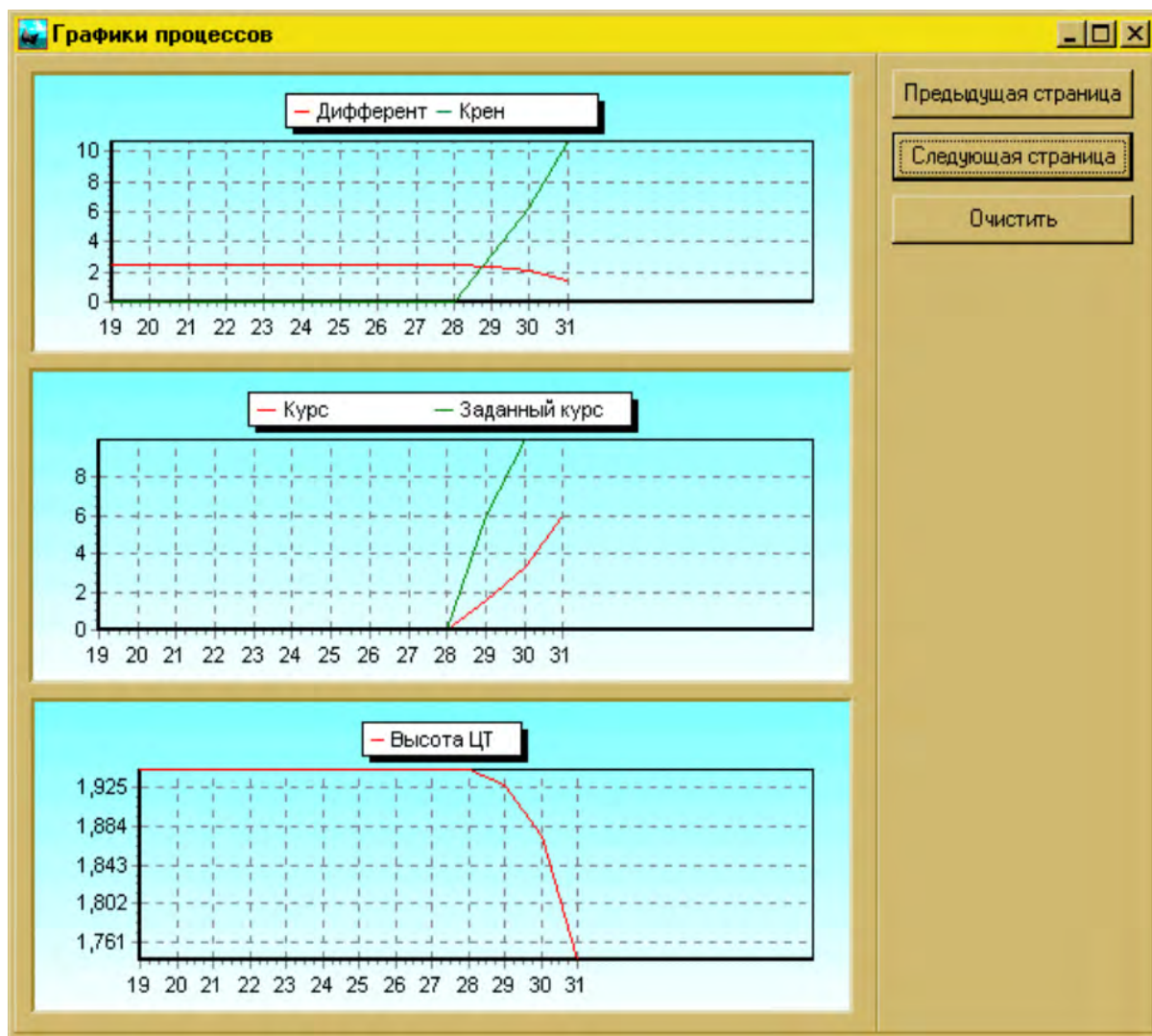


Рис. 3. Окно вывода графиков

### Заключение

На основе исследования математической модели и структуры системы управления судна на подводных крыльях было создан компьютерный тренажер по управлению движением, моделирующий пульт системы управления «Бирюза 2» и позволяющий настраивать как параметры самого СПК, так и параметры волнения.

В предложенном тренажере предусмотрены возможности отображений процесса движения судна в продольной и поперечной плоскостях и графиков изменения во времени соответствующих параметров состояния рассматриваемого объекта.

Созданная программа отслеживает основные ошибки начинающих операторов, допущенные ими в процессе управления движением СПК и моделирует возможные аварийные ситуации, не зависящие от оператора.

Программа позволяет оператору приобрести навыки в управлении таким сложным динамическим объектом как судно на подводных крыльях, а также заменяет дорогостоящие тренажеры, строящиеся на сложной элементной базе.

Разработанный программный тренажер предполагается использовать в качестве средства для обучения судоводителей [10].

В дальнейшем необходимо усовершенствовать разработанную программу, по следующим направлениям:

- добавление новых функциональных возможностей по настройке и работе с программой, таких как, например, ввод ветровых воздействий;
- расширение списка настраиваемых параметров (например, задание алгоритмов управления).

### Литература

1. Короткин И. М. Аварии судов на воздушной подушке и подводных крыльях. — Л.: Судостроение, 1981. — 216 с.
2. Клименков А.Г., Стариченков А.Л., Чернышева Т.С. Программное обеспечение тренажера по управлению движением судна на подводных крыльях // Навигация и управление движением. Сборник докладов IV научно-технической конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, ЦНИИ «Электроприбор», 12-14 марта 2002г. С.218-225.
3. Стариченков А.Л., Никонов М.С. Имитационная модель пространственного движения судна на подводных крыльях // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции «Перспективы развития транспорта России» (в рамках VIII Международной выставки и конференции «Нева–2005»), Санкт-Петербург, 28 сентября 2005 г. С.102-105.
4. Скороходов Д.А., Стариченков А.Л., Чернышева Т.С. Компьютерная технология проектирования систем управления движением высокоскоростных судов // Морской вестник. Специальный выпуск. 2007. №3(6). С.131-133.
5. Мейер Дж. Летящие над водой // Популярная механика. 2007. №11.
6. Андрианов Л.В., Мухина М.Л. Суда на подводных крыльях на переломном этапе своей истории // Морской вестник. 2013. №4(48). С.040-044.
7. Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Скороходов Д.А., Турусов С.Н. Исследование алгоритмической структуры системы управления движением судна на подводных крыльях // Морские интеллектуальные технологии. 2018. №1-1(39). С.153-163.
8. Каминский В.Ю., Маринов М.Л., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л. Управление движением судов на подводных крыльях в нормальных и аварийных ситуациях // Морские интеллектуальные технологии. 2018. №2-2(40). С.127-138.
9. Александров М.А., Скороходов Д.А. Выбор параметров движения исполнительных органов судна на подводных крыльях // Морской вестник. 2019. №4(72). С.15-17
10. Сажаев М.И., Улитенков С.А. Навигационный тренажер на учебном корабле // Морской сборник. 2019. Т. 2070. №9. С.58-61

### References

1. Korotkin I. M. Avarii sudov na vozduшной podushke i podvodnyh kryl'yah [Accidents of hovercrafts and hydrofoils]. — L.: Sudostroenie, 1981. — 216 s.
2. Klimenkov A.G., Starichenkov A.L., Chernysheva T.S. Programmnoe obespechenie trenazhera po upravleniyu dvizheniem sudna na podvodnyh kryl'yah [Software for hydrofoil motion control simulator] // Navigatsiya i upravlenie dvizheniem. Sbornik dokladov IV nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodyh uchenykh, Sankt-Peterburg, CNII «Elektropribor», 12-14 marta 2002g. S.218-225.
3. Starichenkov A.L., Nikonov M.S. Imitatsionnaya model' prostranstvennogo dvizheniya sudna na podvodnyh kryl'yah [Simulation model of 3 dimensional motion of a hydrofoil vessel] // Sbornik trudov Vserossijskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Perspektivy razvitiya transporta Rossii» (v ramkah VIII Mezhdunarodnoy vystavki i konferentsii «Neva–2005»), Sankt-Peterburg, 28 sentyabrya 2005 g. S.102-105.
4. Skorohodov D.A., Starichenkov A.L., Chernysheva T.S. Komp'yuternaya tekhnologiya proektirovaniya sistem upravleniya dvizheniem vysokoskorostnykh sudov [Computer technology for designing high-speed vessel traffic control systems] // Morskoj vestnik. Special'nyj vypusk. 2007. №3(6). S.131-133.
5. Mejer Dzh. Letyashchie nad vodoy [ships that fly] // Populyarnaya mekhanika. 2007. №11.
6. Andrianov L.V., Muhina M.L. Suda na podvodnyh kryl'yah na perelomnom etape svoej istorii [Hydrofoil vessels at a critical stage in their history] // Morskoj vestnik. 2013. №4(48). S.040-044.
7. Kaminskij V.YU., Marinov M.L., Skorohodov D.A., Turusov S.N. Issledovanie algoritmicheskoy struktury sistemy upravleniya dvizheniem sudna na podvodnyh kryl'yah [The study of the algorithmic structure of the system motion control of hydrofoil] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. №1-1(39). S.153-163.
8. Kaminskij V.YU., Marinov M.L., Skorohodov D.A., Starichenkov A.L. Upravlenie dvizheniem sudov na podvodnyh kryl'yah v normal'nyh i avarijnyh situatsiyah [Motion control of hydrofoil vessels in normal and emergency situations] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2018. №2-2(40). S.127-138.
9. Aleksandrov M.A., Skorohodov D.A. Vybore parametrov dvizheniya ispolnitel'nykh organov sudna na podvodnyh kryl'yah [Selection of parameters for the movement of final elements of a hydrofoil vessel] // Morskoj vestnik. 2019. №4(72). S.15-17
10. Sazhaev M.I., Ulitenkov S.A. Navigatsionnyj trenazher na uchebnom korable [Navigation simulator for a training ship] // Morskoj sbornik. 2019. T. 2070. №9. S.58-61

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Алексей Леонидович Стариченков**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой 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: alstar72@yandex.ru

**Alexey L. Starichenkov**, senior lecturer, Dr.Sci. (Eng), Head of the Department of ship control system, St. Petersburg state Electrotechnical University "LETI", 5, ul. Professora Popova, St. Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: alstar72@yandex.ru

**Елизавета Алексеевна Стариченкова**, магистрант, Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7-9, e-mail: starichenkova.li@gmail.com

**Elizaveta A. Starichenkova**, Master student, St. Petersburg state University, 7-9, Universitetskaya Emb., St. Petersburg, 199034, Russian Federation, e-mail: tarichenkova.li@gmail.com



## ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 519.6, 532.3, 639.2  
DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.020

### Расчет прогиба композитного ваера численным методом точечных масс при компьютерном моделировании

А.А. Недоступ<sup>1</sup>, А.О. Ражев<sup>1</sup>, В.А. Наумов<sup>1</sup>, С.В. Дятченко<sup>1</sup>, К.В. Коновалова<sup>1</sup>, Е.В. Соколова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Калининградский государственный технический университет

**Аннотация.** При увеличении скорости и глубины траления необходимо учитывать силы гидродинамического сопротивления ваеров, так как они при этих параметрах достигают значительных величин. Композитные ваера применяются на современных рыбопромысловых судах. В отличие от твердых тел гибкий композитный ваер меняет свою форму в процессе эксплуатации и обладает всеми свойствами канатно-веревочных изделий. В статье рассмотрен метод расчета формы и напряжений в ваере рыболовного трала под действием внешних сил с учетом изгибной жесткости. В отличие от метода расчета без учета изгибной жесткости, при расчете с учетом изгибной жесткости для каждого узла расчетной схемы вводится дополнительная связь и решается система дифференциальных уравнений при заданных начальных и граничных условиях. Рассмотрены численный метод решения, алгоритм которого состоит из двух вложенных циклов, и условия выхода из циклов. Приведен сравнительный анализ результатов численных и натурных экспериментов на предмет выявления погрешностей вычислений.

**Ключевые слова:** композитный ваер, математическая модель, метод точечных масс, гидродинамика

### Calculation of deflection of a composite wire by the numerical method of point masses with computer simulation

Alexander A. Nedostup<sup>1</sup>, Aleksey O. Razhev<sup>1</sup>, Vladimir A. Naumov<sup>1</sup>, Sergey V. Dyatchenko<sup>1</sup>, Karina V. Konovalova<sup>1</sup>, Elena V. Sokolova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kaliningrad State Technical University

**Abstract.** With an increase in the speed and depth of trawling, it is necessary to take into account the forces of the hydrodynamic resistance of the wires, since they reach significant values with these parameters. Composite wires are used with modern fishing vessels. In contrast to solids, a flexible composite wire changes its shape during operation and has all the properties of rope products. The article discusses a method for calculating the shape and stresses in a fishing trawl wire under the action of external forces, taking into account bending stiffness. In contrast to the calculation method without taking into account the bending stiffness, when calculating with an account of the bending stiffness, an additional connection is introduced for each node of the calculation scheme and a system of differential equations is solved for given initial and boundary conditions. A numerical solution method has been reviewed, the algorithm of which consists of two embedded cycles, and the conditions for exiting the cycles. A comparative analysis of the results of numerical and full-scale experiments for the identification of calculation errors has been given.

**Keywords:** composite wire, mathematical model, point mass method, hydrodynamics

#### Введение

Ввод в строй новых рыбопромысловых судов обеспечит увеличение уловов гидробионтов тралами (см. рис. 1) при скоростном и глубоководном тралении. При увеличении скоростей и глубины траления необходимо учитывать силы гидродинамического сопротивления ваеров, так как они при этих параметрах достигают значительных величин [1, 2, 3, 4]. В отличие от твердых тел [5, 6], применяемых в тралах, гибкий композитный ваер меняет свою форму в процессе эксплуатации. Гидродинамические силы, возникающие в процессе движения композитных ваеров влияют на их форму, и наоборот, форма ваеров влияет на силы [7, 8, 9].

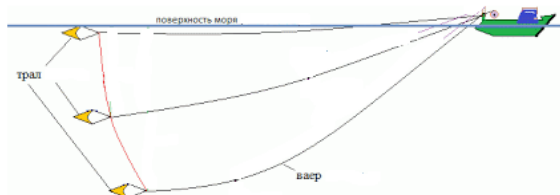


Рис. 1. Траловая система

Как правило, ваера изготавливаются из стальных проволок, и применяются в промышленном рыболовстве при облове скоплений гидробионтов с применением промысловых механизмов - лебедек. Но есть и композитные ваера, которые применяются на современных рыбопромысловых судах в промышленном рыболовстве, судостроении и охране окружающей среды. В данной статье рассмотрим композитный ваер.

Композитный ваер представляет собой трос, свитый по определенным правилам и требованиям. Данный ваер обладает всеми свойствами канатно-веревочных изделий и может быть смоделирован с использованием соответствующих математических моделей. Но для повышения точности моделирования необходимо учитывать различия в характеристиках композита.

#### 1. Цель и задачи

Целью исследования является определение силовых и геометрических зависимостей при моделировании композитного ваера рыболовного трала для задач визуализации траловой системы при ее проектировании (при статической постановке).

Для достижения указанной цели необходимо решить систему дифференциальных уравнений.

В статье будет рассмотрен метод точечных масс [10] применительно к композитному ваеру, при расчете силовых и геометрических характеристик которого необходимо учесть изгибную жесткость.

## 2. Материалы и методы

В условиях стационарности системы в задачах равновесия [11] равнодействующая сила, приложенная к любой точке ваера равна нулю. При этом на взаимное положение в пространстве точек (на форму ваера) накладываются ограничения в виде заданных расстояний между точками.

Рассмотрим метод точечных масс [10] для расчета формы и напряжений в ваере рыболовного трала под действием внешних сил с учетом изгибной жесткости. В расчетной схеме представим ваер в виде графа, состоящего из  $n$  узлов (точечных масс) и связей, описывающих взаимодействие между узлами. В отличие от метода расчета формы и сил в сетных конструкциях без учета их изгибной жесткости [10, 11], при расчете композитного ваера с учетом изгибной жесткости необходимо для каждого узла расчетной схемы вводить дополнительную связь.

Расположим узлы равноудаленно друг от друга по всей длине ваера (см. рис. 2), где  $j = i + 1$ ;  $k = i + 2$ . Для каждого узла введем весовой коэффициент. Для свободных узлов зададим

$$w = \frac{L_B}{2G}, \quad (1)$$

где  $w$  – весовой коэффициент для узла;  $L_B$  – общая длина ваера в ненагруженном состоянии;  $G$  – вес ваера.

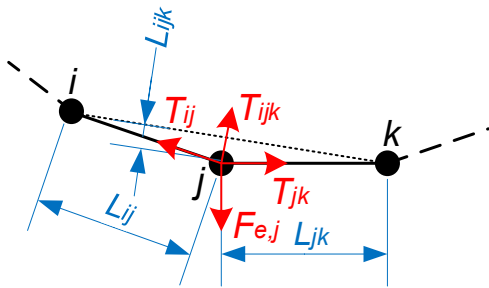


Рис. 2. Расчетная схема ваера

На рисунке 2 показан участок графа, включающий три соседних узла графа  $i, j, k$  (точками обозначены узлы графа, линиями – связи) и силы (обозначены красными стрелками), действующие на узел  $j$ . На рисунке используются следующие обозначения:  $L_{ij}$  – длина участка  $ij$  (длина связи) после деформации ваера;  $L_{jk}$  – длина участка  $jk$  (длина связи) после деформации ваера;  $T_{ij}, T_{jk}$  – сила натяжения (положительная при растяжении, отрицательная при сжатии) участка  $ij$  и  $jk$  соответственно;  $T_{ijk}$  – сила противодействия изгибу в узле  $j$ ;  $F_{e,j}$  – сумма внешних сил, приложенных к узлу  $j$ .

Для фиксированных (не перемещающихся относительно локальной системы координат) узлов зададим  $w = 0$ .

При буксировке и выборке трала на каждый узел действуют как внешние силы (гидростатические, гидродинамические, тяги траулера и т.д.), так и внутренние (силы натяжения в ваере, силы

противодействия изгибу). Для учета внешних сил для каждого узла  $i$  запишем в дифференциальной форме зависимость, связывающую узловое перемещение с изменением внешней силы

$$\frac{dr_i}{dF_{e,i}} = w_i, \quad (2)$$

где  $r_i$  – положение узла в пространстве;  $F_{e,i}$  – сумма внешних сил, приложенных к узлу.

Для учета внутренних сил натяжения для каждой пары соседних узлов  $i$  и  $j$  (см. рис. 1) введем дифференциальные уравнения, связывающие деформацию при растяжении (удлинении) с силой натяжения

$$\frac{dr_i}{dF_{ij}} = w_i, \quad \frac{dr_j}{dF_{ij}} = -w_j, \quad (3)$$

$$dF_{ij} = \frac{2dT_{ij}}{L_{ij}}(r_j - r_i), \quad (4)$$

$$dT_{ij} = \frac{L_{ij} - L_0(1 + 4T_{ij} / (\pi d^2 E_x))}{2(w_i + w_j)} \quad (5)$$

при начальных условиях для всех узлов  $r = r_0$ , для всех связей  $T_{ij} = 0$ , где  $F_{ij}$  – вектор внутренней силы натяжения участка  $ij$ , направленный от узла  $i$  к узлу  $j$ ;  $L_0$  – длина участка в ненагруженном состоянии (одинаковая для всех участков).

Для учета внутренних сил противодействия изгибу для каждых трех соседних узлов  $i, j$  и  $k$  (см. рис. 1) введем дифференциальные уравнения, связывающие деформацию изгиба с силой противодействия изгибу

$$\frac{dr_i}{dF_i} = w_i, \quad \frac{dr_j}{dF_j} = w_j, \quad \frac{dr_k}{dF_k} = w_k \quad (6)$$

$$dF_i = -\frac{dT_{ijk}}{L_{ij}^2 L_{jk}}(r_j - r_i) \times (r_k - r_j) \times (r_j - r_i), \quad (7)$$

$$dF_k = -\frac{dT_{ijk}}{L_{ij}^2 L_{jk}}(r_j - r_i) \times (r_k - r_j) \times (r_k - r_j), \quad (8)$$

$$-dF_j = dF_i + dF_k \quad (9)$$

$$dT_{ijk} = \frac{L_{ijk} - T_{ijk} L_0^3 / (48 E_y J)}{w_i + w_j + w_k}, \quad (10)$$

$$2L_{ijk} = \|r_i + r_k - 2r_j\|, \quad (11)$$

при начальных условиях для всех узлов  $r = r_0$ , для всех связей  $T_{ijk} = 0$ , где  $F_i, F_j, F_k$  – вектора внутренних сил противодействия изгибу, приложенных к узлам  $i, j, k$  соответственно;  $E_y J$  – изгибная жесткость ваера.

Рассмотрим численный метод решения указанных уравнений итерационным методом последовательного приближения. Алгоритм решения состоит из двух вложенных циклов. Во внешнем цикле вычисляются узловые перемещения под действием внешних сил, во внутреннем – внутренних.

При переходе к конечно-разностной схеме произведем замены

$$dr = r^{[l+1]} - r^{[l]}, \quad dT = T^{[l+1]} - T^{[l]}, \quad (12)$$

где  $[l]$  – номер итерации.

Условие завершения итерационного процесса во внутреннем цикле – достижение заданной минимальной невязки по всем перемещениям

$$dr < \varepsilon_L L_0, \quad (13)$$

где  $\varepsilon_L$  – заданная погрешность по геометрическим характеристикам.

Условие завершения итерационного процесса во внешнем цикле вытекает из условия стационарности системы в задачах равновесия [11], при котором равнодействующая сила, приложенная к каждому узлу, равна нулю, либо меньше заданной минимальной невязки

$$\left\| \mathbf{F}_{e,i} + T_{ij} \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j}{L_{ij}} + T_{jk} \frac{\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_j}{L_{jk}} \right\| < \varepsilon_F F_{e,i}, \quad (14)$$

где  $\varepsilon_F$  – заданная погрешность по силовым характеристикам.

Для узлов на концах нитки, веревки, каната или ваера соответствующие слагаемые в (14) не учитываются.

В задаче определения формы провисания ваера, находящегося в потоке воды, внешние силы определяются исходя из гидростатических, гидродинамических сил и сил тяжести [1, 3, 4, 6, 9], действующих на каждый элемент ваера между узлами модели. Один конец ваера фиксируется ( $w=0$ ) на судне, ко второму прикладывается внешняя сила

от трала. В (3) и (6) для каждого узла вводятся граничные условия  $r_y > r_b$ , где  $r_b$  – вертикальная координата дна водоема.

В задаче определения формы провисания нитки, находящейся под действием сил тяжести, на штыре в (3) и (6) вводятся граничные условия

$$\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_b\| \geq R, \quad (15)$$

где  $\mathbf{r}_b$  – позиция центра штыря,  $R$  – радиус штыря.

Для задач расчета формы ниток, веревок, канатов под действием силы тяжести

$$F_{e,i} = m l (n-1), \quad G = mg \quad (16)$$

для узлов соединения элементов цепной линии и

$$F_{e,i} = m l (2n-2) \quad (17)$$

для узлов на концах, где  $m$  – масса нитки, веревки, каната;  $g$  – ускорение свободного падения.

### 3. Результаты

Для верификации описанной математической модели была разработана компьютерная программа по имитации изгиба нитки, веревки или каната (см. рис. 3), закрепленной на штыре, под действием сил тяжести.



Рис. 3. Компьютерная программа «Моделирование изгиба крученных рыболовных ниток, веревок и канатов»

Сопоставление результатов численных экспериментов производилось с результатами натуральных экспериментов с различными образцами ниток. Сопоставлялись как силовые, так и геометрические характеристики.

Для сопоставления было взято несколько образцов. Характеристики двух образцов приведены в таблице 1. Эксперименты проводились в лаборатории Калининградского государственного технического университета. На стенд,

представляющий собой плоскость с нанесенной миллиметровой разметкой (миллиметровой бумагой), расположенную вертикально, устанавливались штыри различного диаметра. Исследуемые образцы навешивали на штыри. Под действием сил тяжести образцы прогибались. Форма прогиба фиксировалась при помощи видеосъемки.

Результаты натуральных экспериментов по образцам приведены в таблице 2.

Таблица 1

Характеристики экспериментальных образцов

Образец/ Диаметр $d$ , мм	Длина $L_B$ , м	Линейная плотность $T$ , текс	Кол-во прядей $n_{\Pi}$	Кол-во круток на метр $\zeta$ , $N_k/m$
1. Полиэфир (ПЭФ) $d=2,0$ мм	0,20	2400	3	320
2. Полипропилен (ПП) $d=2,0$ мм	0,25	1600	3	320

Таблица 2

Экспериментальные значения изгибной жесткости  $E_y J_{НИ}$  НИ, диаметр штыря  $D=30$  мм

Образец/ Диаметр $d$ , мм	Длина $L_B$ , м	Масса $m$ , кг	Изгибная жесткость $E_y J$ , $Nm^2$	Координаты концов $(x, y)$ , мм
1. Полиэфир (ПЭФ) $d=2,0$ мм	0,20	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	(-86;-36) (85;-34)
2. Полипропилен (ПП) диаметром $d=2,0$ мм	0,25	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	(-36;-92) (32;-90)

Результаты численных экспериментов по этим же образцам приведены в таблице 3.

На рисунках 4 и 5 показана форма образцов № 1 и № 2 соответственно. На рисунках 6 и 7 показана форма тех же образцов, полученная при численном эксперименте.



Рис. 4. Форма образца № 1 при натурном эксперименте

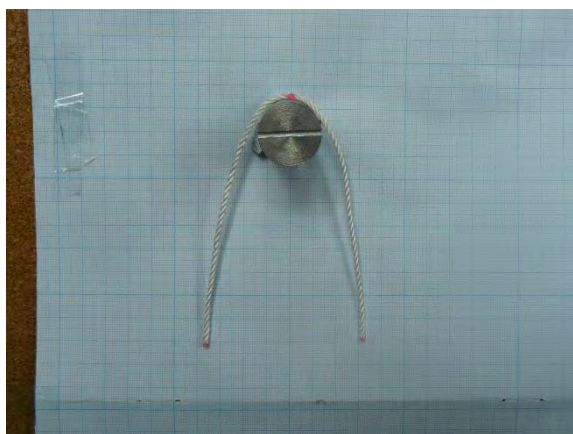


Рис. 5. Форма образца № 2 при натурном эксперименте

Таблица 3  
Расчетные значения изгибной жесткости  $E_y J_{НИ}$  НИ, диаметр штыря  $D=30$  мм

Образец/ Диаметр $d$ , мм	Длина $L_B$ , м	Масса $m$ , кг	Изгибная жесткость $E_y J$ , $Nm^2$	Координаты концов $(x, y)$ , мм
1. Полиэфир (ПЭФ) $d=2,0$ мм	0,20	$4,8 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	(-82;-34) (82;-34)
2. Полипропилен (ПП) диаметром $d=2,0$ мм	0,25	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	(-37;-94) (37;-94)

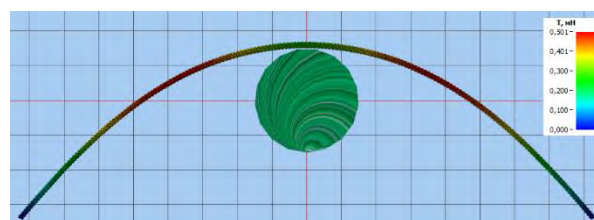


Рис. 6. Форма образца № 1 при численном эксперименте



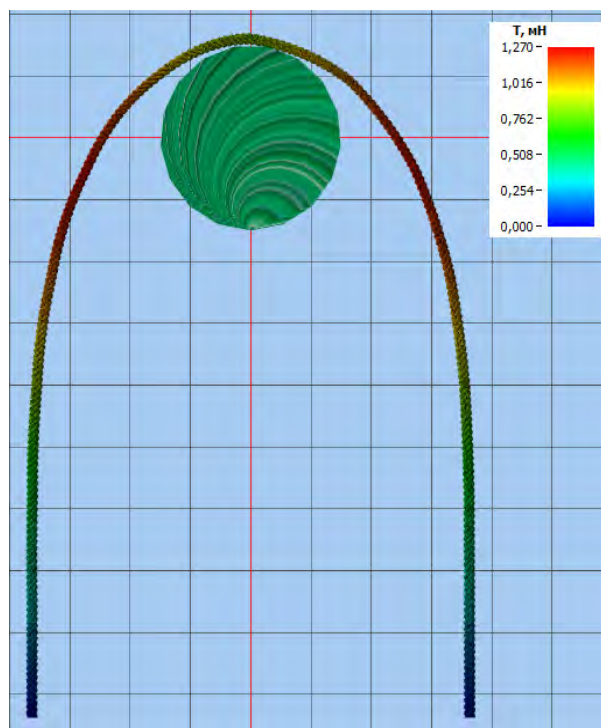


Рис. 7. Форма образца № 2 при численном эксперименте

На рисунках 6 и 7 цветами обозначены силы напряжений в нитке согласно цветовой шкалы HSV.

### Заключение

Анализ результатов численных и натурных экспериментов на нитках показывает, что погрешность геометрических характеристик не превышает 5 %, что достаточно для большинства задач по расчету рыболовных тралов. Для более точного анализа необходимо провести верификацию численных моделей с натурным тралом.

По мнению авторов статьи, описанная математическая модель хорошо подходит для реализации на ее основе имитационных моделей для задач предварительного расчета и имитации траловых систем, расчета силовых и геометрических характеристик ваера при трехмерной визуализации трала на современных ЭВМ широкого применения. Данную математическую модель возможно оптимизировать методом распараллеливания вычислений для современных многоядерных и гетерогенных систем [9], к которым относится большинство современных персональных компьютеров.

Недостатком модели является увеличение погрешности результатов при больших, близких к разрывным, нагрузках ваера, а также при больших его изгибах в следствии их нелинейной природы.

### Благодарности

Научное исследование и публикация статьи выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калининградской области в рамках научного проекта № 19-48-390004.

### Литература

1. Чубаров С.Н. О влиянии гидродинамических сил на ваер и выбор тросов для скоростного и глубоководного траления. Рыбное хозяйство. №5. - 1962. - С. 45-49.
2. Фридман А.Л., Карпенко В.П. Управление рабочими режимами тралового лова. Рыбное хозяйство. №12. - 1970. - С. 28-31.
3. Берзилев И.Л., Дедов В.Г. Определение формы буксируемых тросов в воде. Рыбное хозяйство. №10. - 1972. - С. 55-56.
4. Обвинцев А.Л., Тютхин Б.Ф. Расчет формы и натяжения буксируемого троса. Рыбное хозяйство. №5. - 1975. - С. 40-43.
5. Алдошкин Ю.Г. Введение в механику твердого тела : Основные понятия и общ. метод сост. уравнений движения / Ю.Г. Алдошкин; С предисл. В.В. Белецкого и Т.М. Энеева. - М. : Мир, 2003. - 304 с. ISBN 5-03-003554-0
6. Недоступ А.А., Ражев А.О. Математическая модель взаимодействия распорной траловой доски с водной средой. Морские интеллектуальные технологии. №3(37) Т.1. 2017. - С. 154-157.
7. Розенштейн М.М., Недоступ А.А. Механика орудий рыболовства. М. - Моркнига. - 2011. 528 с.
8. Карпенко В.П., Фридман А.Л. Устройства раскрытия рыболовных тралов. - М: Пищевая промышленность. - 1980. - 248 с.
9. Габрюк В.И. Параметры разноглубинных тралов. М: Агропромиздат. - 1988. - С. 214.
10. Недоступ А.А., Ражев А.О., Коротков В.К. Моделирование композитных сетных конструкций методом точечных масс при динамической постановке задачи. Морские интеллектуальные технологии. №4(42) Т.4. 2018. - С. 254-258.
11. Розенблат Г.М. Механика в задачах и решениях. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 160 с. ISBN 5-354-00727-5.

### References

1. Chubarov S.N. To the effect of hydrodynamic forces on the trawl warp and choice of cables for high-speed and deep-sided trawling. Fisheries. №5. - 1962. - pp. 45-49.
2. Friedman A.L., Karpenko V.P. Management of operating modes of trawl fishing. Fisheries. №12. - 1970. - pp. 28-31.
3. Berzileev I.L., Dedov V.G. Determining the shape of towed cables in water. Fisheries. №10. - 1972. - pp. 55-56.
4. Obvintsev A.L., Tyukhtin B.F. Calculation of the shape and tension of the towed cable. Fisheries. №5. - 1975. - pp. 40-43.
5. Aldoshkin Yu.G. Introduction to solid mechanics: Basic concepts and general. method comp. equations of motion / Yu.G. Aldoshkin; From the foreword V.V. Beletsky and T.M. Eneev. - M.: Mir, 2003. -- 304 p. ISBN 5-03-003554-0

6. Nedostup A.A., Razhev A.O. A mathematical model of the interaction of a trawl otter board with an water column. Marine intelligent technology. №3(37) V.1. 2017. - pp. 154-157.
7. Rosenstein M.M., Nedostup A.A. Mechanics of fishing tools. M. - Morkbook. - 2011. 528 p.
8. Karpenko V.P., Friedman A.L. Fishing trawl opening devices. - M: Food industry. - 1980. - 248 p.
9. Gabruk V.I. Parameters of midwater trawls. M: Agropromizdat. - 1988. - p. 214.
10. Nedostup A.A., Razev A.O., Korotkov V.K. Modeling of composite mesh constructions using the point mass method in the dynamic statement of the problem. Marine intelligent technology. №4(42) V.4. 2018. - p. 254-258.
11. Rosenblatt G.M. Mechanics in objectives and solutions. - M.: URSS editorial, 2004. -- 160 p. ISBN 5-354-00727-5.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Александр Алексеевич Недоступ**, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: nedostup@klgtu.ru

**Алексей Олегович Ражев**, соискатель кафедры промышленного рыболовства, младший научный сотрудник, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: progacpp@live.ru

**Владимир Аркадьевич Наумов**, доктор технических наук, заведующий кафедрой водных ресурсов и водопользования, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: van-old@mail.ru

**Сергей Васильевич Дятченко**, доктор технических наук, заведующий кафедрой кораблестроения, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: sergey.diatchenko@klgtu.ru

**Карина Витальевна Коновалова**, магистрант кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: kova.rina4382@mail.ru

**Елена Валерьевна Соколова**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, 236022, Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: sokolovahelena@mail.ru

**Alexander A. Nedostup** Ph.D. (Eng), assistant professor of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: nedostup@klgtu.ru

**Aleksey O. Razhev**, Research scholar of the Industrial Commercial Fisheries Department, Junior Researcher, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: progacpp@live.ru

**Vladimir A. Naumov**, Dr. Sci. (Eng), Head of the Department Water Resources and Water Use, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetskiy prospect, 1, e-mail: van-old@mail.ru

**Sergey V. Dyatchenko**, Dr. Sci. (Eng), Head of the Department of Shipbuilding, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky Prospect, 1, e-mail: sergey.diatchenko@klgtu.ru

**Karina V. Konovalova**, student of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky Prospect, 1, e-mail: kova.rina4382@mail.ru

**Elena V. Sokolova**, Ph.D. (Eng), Senior Lecturer of the Commercial Fisheries Department, Kaliningrad State Technical University, 236022, Kaliningrad, Sovetsky Prospect, 1, e-mail: sokolovahelena@mail.ru

УДК 621.7.012.5

DOI 10.37220/MIT.2020.48.2.045

## Математическая модель процесса точения с использованием вибрационного воздействия на режущий инструмент

А.Н. Синько<sup>1</sup>, Т.Ю. Никонова<sup>1</sup>, В.В. Юрченко<sup>1</sup>, А.К. Матешов<sup>1</sup>, И.А. Марченко<sup>1</sup><sup>1</sup>Карагандинский государственный технический университет

**Аннотация** В статье авторами проведено математическое моделирование процесса точения с использованием волнового воздействия на режущий инструмент. Установлены зависимости между видом образующейся стружки и качеством обработанной поверхности от интенсивности вводимых в зону резания колебаний, а также численные данные параметров режима резания. Авторами установлено, что существует определенный оптимальный уровень колебаний, при котором наблюдается максимальная стойкость инструмента, повышение производительности и улучшение качества обработанной поверхности. Данные зависимости позволяют разработать структурную схему и последовательность проектирования операций с применением вибрационного точения. Для данного процесса авторами установлен оптимальный уровень интенсивности колебаний применительно к инструментам, оснащенным твердым сплавом, при обработке конструкционных и высоколегированных материалов.

Практической значимостью работы является получение математических моделей о процессе точения с использованием вибрационного воздействия на режущий инструмент, на основании которых были получены данные и созданы прототипы режущих инструментов для применения в аппаратах вибрационного точения. Основной методикой получения математических данных о вибрационном воздействии на режущий инструмент является обобщение многочисленных экспериментальных данных, а также проведение исследования с помощью программ твердотельного проектирования.

В результате исследований получены параметрические уравнения, позволяющие на стадии проектирования прогнозировать и описывать траекторию движения режущей кромки резца при вибрационном воздействии на режущий инструмент. Получены графические схемы траектории перемещения режущей кромки инструмента, демонстрирующие переменное сечение срезаемого слоя при вибрационном воздействии на режущий инструмент.

**Ключевые слова:** Математическое моделирование, вибрационное резание, металлорежущий инструмент, дробление стружки.

## Mathematical model of the turning process using vibration impact on the cutting tool

Alexander N. Sin'ko<sup>1</sup> Tatyana Yu. Nikonova<sup>1</sup>, Vasily V. Yurchenko<sup>1</sup>, Arman K. Mateshov<sup>1</sup>, Ilya A. Marchenko<sup>1</sup><sup>1</sup>Karaganda State Technical university

**Abstract.** The purpose of this work is to obtain mathematical data about the turning process using vibration effects on the cutting tool. The main method for obtaining mathematical data on the vibration effect on the cutting tool is to generalize numerous experimental data, as well as conducting research using solid-state design programs.

In the course of the work, mathematical modeling of the turning process was carried out using the wave effect on the cutting tool. The dependences between the type of chips formed and the quality of the treated surface on the intensity of vibrations introduced into the cutting zone, as well as numerical data on the parameters of the cutting mode, are established. It has been established that there is a certain optimal level of oscillation at which the maximum tool life, increased productivity and improved quality of the treated surface are observed. These dependencies allow you to develop a block diagram and design sequence for the vibration turning operation. For vibration turning, the optimal level of vibration intensity is set for tools equipped with a hard alloy when processing structural and high-alloy materials. The obtained parametric equations make it possible to predict and describe the trajectory of the cutting edge of the cutter at the design stage when the cutting tool is vibrated. Graphic diagrams of the trajectory of the cutting edge of the cutting tool are obtained, showing a variable cross-section of the cut layer under vibration action on the cutting tool.

In this work, the regularities of vibration turning during turning are shown. On the basis of which practical data were obtained and prototypes of cutting tools for use in vibration turning devices were created.

**Key words:** Mathematical modeling, vibration cutting, metal cutting tools, chip crushing.

### Введение

Наиболее распространенным методом обработки деталей класса «тела вращения», к которому относится более 70% всех деталей машиностроительного производства, является токарная обработка. В современном производстве широко используются конструкционные углеродистые и легированные стали, имеющие высокую вязкость. Сливная стружка, образуемая в процессе их точения, считается неблагоприятной по

ряду причин. Она наматывается на инструмент и обрабатываемую заготовку, что затрудняет ее удаление из зоны резания и контроль процесса обработки, является источником травматизма рабочих. При попадании стружки под режущую кромку инструмента происходит снижение качества обработанной поверхности. Сливная стружка имеет большой объем, что усложняет процесс уборки, складирования и транспортировки.

В связи с этим к числу наиболее острых проблем, возникающих при организации процесса резания

конструкционных углеродистых и легированных сталей на токарных станках с ручным управлением, автоматизированном оборудовании и станках с ЧПУ является:

- Высокая температура элементов СПИД;
- Проблема управления формообразованием стружки и получения элементов необходимых размеров, для чего применяются различные методы и способы стружкодробления, а также, в процессе резания обрабатываемая деталь и режущая кромка инструмента совершают упругие колебания.

Поэтому для достижения особо высокой точности обработки необходимо не только проводить статический анализ взаимного расположения обрабатываемой детали и инструмента (что непосредственно влияет на точность обработки), но и в определенной степени анализировать колебательную систему станок—приспособление—инструмент—обрабатываемая деталь динамически, т. е. в ходе колебаний [1-8].

Изыскание новых методов обработки металлов резанием ведется путем изменения характера приложения механического воздействия на срезаемый слой (например, на вибрационное, сверхскоростное), использования качественно новых видов воздействия на материал срезаемого слоя (химического, электрического), применения комбинированных методов обработки, построенных на совмещении равномерного механического воздействия с вибрационным, тепловым, химическим, электрическим воздействиями.

Сочетание каждого из этих процессов с другими, а также комбинации из трех или четырех элементов определяют известные к настоящему времени новые методы обработки металлов резанием. Комбинированные методы обработки отличаются наибольшей эффективностью. Значительное место среди них занимает механическая обработка с вибрациями в специальных средах, совмещающая равномерное движение резания с вибрационным воздействием на материал срезаемого слоя в химически активной среде.

Применение резания с вибрациями на оптимальных режимах позволяет успешно решать многие актуальные проблемы, стоящие перед металлообрабатывающей промышленностью.

Резание с вибрациями обеспечивает надежное дробление стружки. Интенсификация процессов механической обработки путем использования твердосплавного и керамического инструментов, применения методов многоинструментальной обработки и силового резания резко увеличивает количество стружки.

#### Методика исследований

Для определения траекторий движения режущей кромки инструмента и выбора рациональных конструктивных и технологических параметров инструментов, в зависимости от различных технологических условий обработки при черновом и получистовом продольном наружном точении, целесообразно разработать математическую модель возникновения и поддержания в зоне резания направленных колебаний [9-12].

С этой целью предложена схема точения с вибрациями в осевом направлении (рисунок 1), основанная на принципе возбуждения колебаний

режущей кромки инструмента, посредством установки между резцом и корпусом державки упругого элемента, создающего в направлении движения подачи наименьшую регулируемую жесткость.

Современные методы моделирования процесса резания методом конечных элементов получили в настоящее время значительное развитие, обеспечивая возможность прогнозирования формы и размеров стружки и обработанной поверхности, напряженно-деформированного состояния, температурного поля, проекций силы резания, остаточных напряжений, в случае необходимости даже с подводом дополнительной энергии.

Результаты моделирования, особенно 3D, совпадают с экспериментом более качественно, чем количественно.

Наиболее вероятными причинами такой ситуации являются несовершенство алгоритмов моделирования разрушения и трения, а также неточности в подготовке исходных данных.

В основу КЭ-моделей процесса резания положена математическая теория пластичности.

Среди применяемых допущений в известных решениях чаще всего используется допущение об изотропной несжимаемой среде [13-15].

В настоящее время остается нерешенной проблема достоверного прогнозирования показателей процесса резания в широком диапазоне скоростей резания. До сих пор не существует работ, которые показали бы адекватность КЭ-моделей в широком диапазоне режимов резания.

Анализ целей технологического процесса позволил сформулировать такие группы целевых эффектов в решении задач моделирования:

1. Обеспечение показателей качества механической обработки:
  - a) точности размеров;
  - b) точности формы и взаимного положения;
  - c) качества обработанной поверхности;
  - d) исключения формирования заусенцев.
2. Обеспечение ресурса и надежности работы инструмента.
3. Обеспечение стружкодробления.
4. Расчет фундаментальных показателей процесса.

Определение структуры прогнозирующих моделей должно осуществляться на основе сопоставления уровня детализации и целевых эффектов, которые подлежат исследованию [15-17].

Определение оптимальных режимов резания инструментами со сложной геометрической формой с помощью известных аналитических моделей и методов невозможно без значительных допущений, а проведение экспериментальных исследований связано с большими затратами ресурсов и времени.

В этих условиях решение задачи прогнозирования оптимального режима резания может быть выполнено путем моделирования рабочего процесса методом конечных элементов.

Практическое применение прогнозирующих моделей рабочих процессов резания эффективно, когда обеспечивается решение поставленной задачи исследования путем оптимизации рабочего процесса в срок, значительно опережающие экспериментальные исследования. Исходя из того, что проектирование модели связано с выполнением



целого ряда этапов, на каждом из которых тратится время и модель может содержать погрешности, должны быть исследованы вопросы достоверности прогнозирующей модели, причины возникновения отклонений и факторы, с помощью которых возможно контролировать эту погрешность, а также установить связь погрешности модели с тем временем, которое необходимо для выполнения расчетов [18-20]. На основе этих исследований должны быть разработаны принципы практического применения конечно-элементных моделей для исследования и оптимизации рабочих процессов резания, обеспечивающих получение результата в кратчайшее время с приемлемой погрешностью.

Рассмотрим расчетную схему (рисунок 1) с приложением вибрационных нагрузок на режущий инструмент, действующих в осевом направлении при токарной обработке.

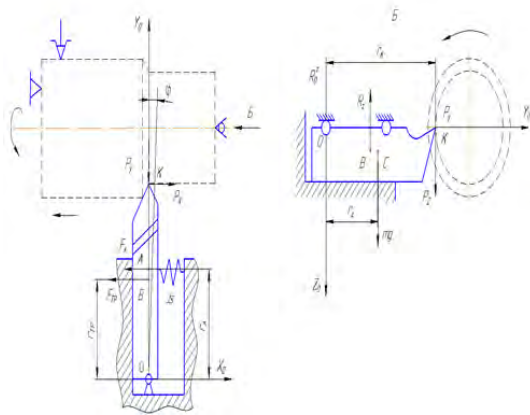


Рис. 1. Схема точения с вибрациями в осевом направлении

На рисунке 1 приняты следующие обозначения:  $\varphi$  – угол поворота резца вокруг оси z (обобщенная координата);  $P_x, P_y, P_z$  – составляющие (проекции) силы резания, Н;  $F_A$  – сила упругости, Н;  $F_{TP}$  – сила трения, Н;  $R_{z0}$  – реакция в шарнирной опоре по оси z, Н;  $R_z$  – нормальная реакция, Н;  $j_s$  – жесткость упругого элемента, Н/мм;  $r_A$  – расстояние до точки приложения силы упругости пружины, мм;  $r_{TP}$  – расстояние до точки приложения трения, мм;  $r_C$  – расстояние до центра тяжести системы (масс), мм;  $r_K$  – расстояние до вершины режущего инструмента, мм;  $t$  – масса колеблющейся системы, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Из рисунка 1 и 2 в соответствии с принципом Даламбера уравнения равновесия сил (1) примут вид:

$$\begin{cases} P_p + F_A + F_{TP} + R_0 + R_z + mg + \Phi = 0 \\ (r_K + P_p) + (r_A + F_A) + (r_{TP} + F_{TP}) + M_{TP}^0 + M^\Phi = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где  $F_A$  – сила упругости;

$F_{TP}$  – сила трения;

$R_0$  – реакция опоры в точке 0;

$R_z$  – нормальная реакция;

$\Phi$  – сила инерции;

$r_K, r_A, r_{TP}$  – радиусы-векторы точек приложения сил;

$M_{TP}$  – момент трения относительно точки 0 (начала системы координат);

$M^\Phi$  – момент сил инерции относительно точки 0.

$$F_A = j_s \varphi r_A, \quad (2)$$

Суммарное линейное и угловое перемещение (рис. 1):

$$\begin{cases} P_x - j_s \varphi r_A \cos \varphi - F_{TP} \cos \varphi - R_0^x \cos \varphi + \\ + R_0^y \sin \varphi - m \frac{dV_C}{dt} \cos \varphi + m \frac{V_C^2}{r_C} \sin \varphi = 0 \\ - P_y + j_s \varphi r_A \sin \varphi + F_{TP} \sin \varphi + R_0^x \sin \varphi + \\ + R_0^y \cos \varphi + m \frac{dV_C}{dt} \sin \varphi + m \frac{V_C^2}{r_C} \sin \varphi = 0 \\ P_z + mg - R_z - R_0^z = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

где  $R_0^x$  и  $R_0^y$  – реакции в шарнирной опоре по соответствующим осям.

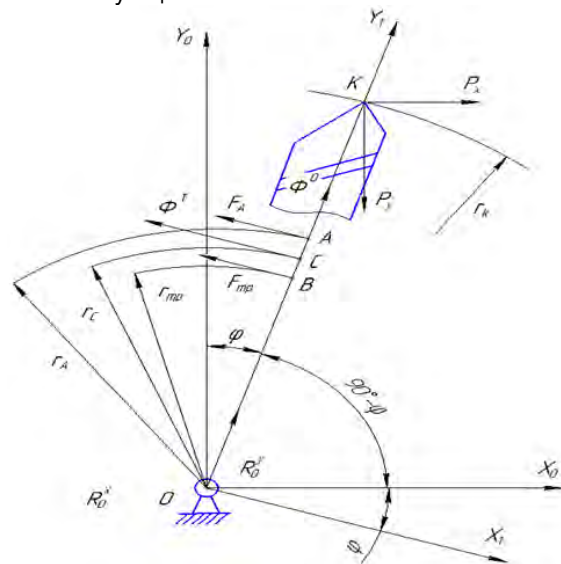


Рис. 2. Расчетная схема действующих сил при точении с вибрациями

Векторное произведение двух векторов выражается определителем, в первой строке которого расположены единичные векторы  $i_0, j_0, k_0$ , направленные вдоль осей координат, а в двух других строках – проекции на оси координат векторов сомножителей [19]:

$$\begin{vmatrix} i_0 & j_0 & k_0 \\ r_k \sin \varphi & r_k \cos \varphi & 0 \\ P_x & -P_y & -P_z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} i_0 & j_0 & k_0 \\ r_k \sin \varphi & r_k \cos \varphi & 0 \\ -F_A \cos \varphi & F_A \sin \varphi & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} i_0 & j_0 & k_0 \\ r_{TP} \sin \varphi & r_{TP} \cos \varphi & 0 \\ -F_{TP} \cos \varphi & F_{TP} \sin \varphi & 0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ J_0^0 \varepsilon \end{vmatrix} = 0 \quad (4)$$

Путем математических преобразований получим следующие уравнение:

$$\begin{aligned} & (J_0^z + mr_C r_K) \ddot{\varphi} - j_s \varphi r_A (r_A - r_K) = \\ & = F_{tp} (r_{tp} - r_K) - R_0^x r_K + (M_{tp}^0)_z \end{aligned} \quad (5)$$

Уравнение (5) – неоднородное обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка. Его решение представляется в виде суммы общего решения соответствующего однородного уравнения  $\varphi$  и частного решения неоднородного уравнения  $\varphi$ , окончательно получим:

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \left( -\frac{F_{tp} (r_{tp} - r_K) + R_0^x r_K - (M_{tp}^0)_z}{j_s r_A (r_A - r_K)} + \varphi_0 \right) \times \\ & \times \cos \left( \sqrt{\frac{j_s r_A (r_A - r_K)}{J_0^z + mr_C r_K}} t \right) + \varphi_0 \sqrt{\frac{J_0^z + mr_C r_K}{j_s r_A (r_A - r_K)}} \times \\ & \times \sin \left( t \sqrt{\frac{j_s r_A (r_A - r_K)}{J_0^z + mr_C r_K}} \right) + \frac{-F_{tp} (r_a - r_K) + R_0^x r_K - (M_{tp}^0)_z}{j_s r_A (r_A - r_K)} \end{aligned} \quad (6)$$

Посредством пакета *Mathematica* производится компьютерное моделирование динамического поведения режущей кромки инструмента при вибрационном точении с осевой подачей. Моделирование уравнений (5) и (6) показало, что наибольшее влияние на условия дробления стружки оказывают: составляющая силы резания  $R_x$ , жесткость упругого элемента  $j_s$  и габаритные размеры инструмента. Поэтому для практических целей целесообразно использовать упрощенную схему колебательной системы. Такая схема представлена на рисунке 3.

В ходе моделирования, с помощью пакета *Mathematica* при вибрационном точении в соответствии с уравнением (6), установлена возможность реализации траекторий движения режущей кромки инструмента, обеспечивающих переменное сечение срезаемого слоя, следовательно, и дробление стружки при продольном наружном точении. Выявлено, что для поддержания необходимой интенсивности вибраций при изменении осевой составляющей силы резания  $R_x$  от 350 Н до 650 Н жесткость упругих элементов  $j_s$  должна соответствовать диапазону 200-350 Н/мм. Полученные при моделировании расчетные траектории движения вершины режущей кромки соответствуют траекториям, записанным на виброграммах при проведении экспериментальных исследований (рис. 3,4). Адекватность совпадения траекторий проверена и подтверждена посредством методов математической статистики [19].

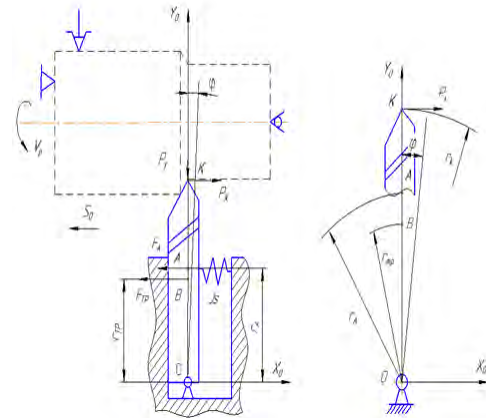


Рис. 3. Расчетная схема колебательной системы при вибрационном точении с осевой подачей

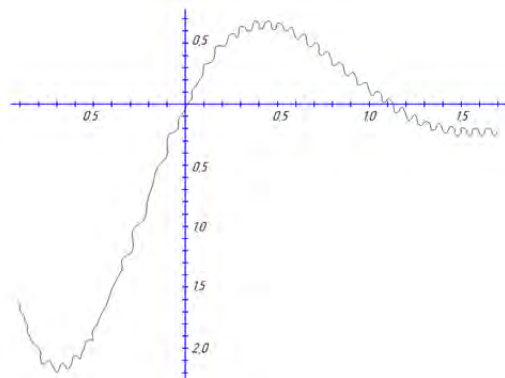


Рис. 4. Траектория движения вершины режущей кромки инструмента при продольном наружном точении

Вибрационное точение с возбуждением вибраций в радиальном направлении является эффективным средством дробления стружки на операциях с поперечной подачей (отрезка, прорезка, обработка фасонными резцами) [18]. На рисунке 5 показана кинематическая схема точения с поперечной подачей и радиальными вибрациями. Штриховой линией 1 обозначен след вершины резца, оставляемый на заготовке при равномерном резании, сплошной линией 2 - тот же след при наложении радиальных вибраций.

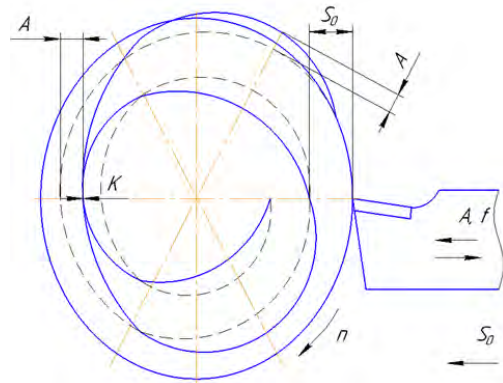


Рис. 5. Схема точения с поперечной подачей и радиальными вибрациями

Из рисунка видно, что в определенные моменты времени имеет место совпадение вершины резца (точка К) на двух соседних оборотах. Это приводит к образованию нулевой площади сечения срезаемого слоя и надежному дроблению стружки.

Для определения динамического поведения режущей кромки инструмента при вибрационном точении с поперечной подачей составим расчетную схему действующих сил (рисунок 6).

Используем уравнение Лагранжа II рода. Примем за обобщенную координату перемещение резца вдоль оси у. Уравнение Лагранжа для рассматриваемой системы имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta T}{\delta \dot{y}} \right) - \frac{\delta T}{\delta y} = - \frac{\delta \Pi}{\delta y} + Q_y \quad (7)$$

где Т – кинетическая энергия системы;

Π – потенциальная энергия системы;

Q – обобщенная сила, соответствующая неконсервативным силам.

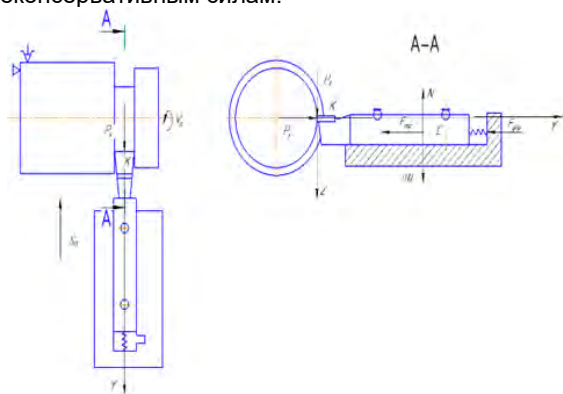


Рис. 6. – Расчетная схема действующих сил при вибрационном точении с поперечной подачей

Параметрические уравнения траектории движения режущей кромки инструмента тогда примут вид:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= r(t) \cos[\varphi(t)] = [R - S_0 t - y(t)] \cos(\omega t) \\ y_1(t) &= r(t) \sin[\varphi(t)] = [R - S_0 t - y(t)] \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (8)$$

где, 
$$y(t) = \frac{P_y - F_{sp}}{j_s} \left( 1 - \cos \left( t \sqrt{\frac{j_s}{m}} \right) \right)$$

Полученные параметрические уравнения позволяют для заданных конструктивных параметров инструмента и режимов резания на стадии проектирования операции вибрационного точения прогнозировать и описывать траекторию вибрационного движения режущей кромки, обеспечивающую переменное сечение срезаемого слоя, при выполнении отрезных и прорезных работ.

При помощи пакета Mathematica производится компьютерное моделирование динамического

поведения режущей кромки инструмента при вибрационном точении с поперечной подачей. Результаты компьютерного моделирования показали, что основное влияние на траекторию перемещения вершины режущей кромки инструмента при вибрационном точении с поперечной подачей оказывает радиальная составляющая силы резания  $P_y$  и жесткость упругого элемента  $j_s$ .

На рисунке 8 представлена траектория перемещения режущей кромки инструмента на различном количестве оборотов заготовки, полученная при компьютерном моделировании обработки заготовки.

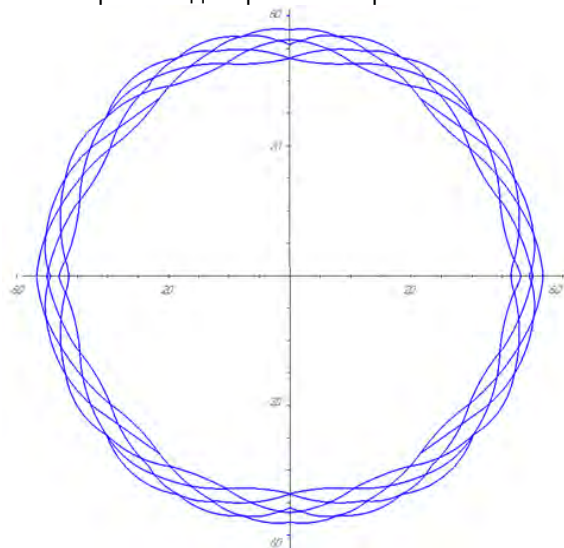


Рис. 7. Расчетная траектория перемещения режущей кромки инструмента при точении с поперечной подачей и радиальными вибрациями

### Заключение

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований установлены зависимости между видом образующейся стружки и качеством обработанной поверхности от интенсивности вводимых в зону резания колебаний. Установлено, что для каждой технологической операции существует определенный оптимальный уровень колебаний, при котором наблюдается максимальная стойкость инструмента, повышение производительности и улучшение качества обработанной поверхности. Данные зависимости позволяют разработать структурную схему и последовательность проектирования операции вибрационного точения.

Для вибрационного точения установлен оптимальный уровень интенсивности колебаний применительно к инструментам, оснащенным твердым сплавом, при обработке конструкционных и высоколегированных материалов.

### Литература

1. Зорев Н.Н., Вопросы механики процесса резания металлов. Машгиз, 2016 – 368 с.
2. Зорев Н.Н., Фетисова З. М. Обработка резанием тугоплавких сплавов. «Машиностроение», 2016 – 227 с.
3. Исследование вибраций при обработке на станках резанием. Сборник под ред. акад. Дикушина В. И, проф. Решетова Д. Н. Машгиз, 2018 – 294 с.
4. Воронин А. А, Марков А. И. Влияние ультразвуковых колебаний на процесс резания жаропрочных сплавов. «Станки и инструмент», 1960, № 11 С. 34–41

5. Грановский Г. И. О стойкости инструмента как об исходном параметре для расчетов режимов резания. «Вестник машиностроения», 1965 С. 59–64.
6. Динамика процесса резания. Сборник ЭНИМС. Машгиз, 1956 – 158 с.
7. Захаров Ю. Е., Баранов В. Н. Гидравлические и электро- гидравлические вибраторы для технологических целей в машиностроении. «Известия вузов. Машиностроение». 1961, № 5, С. 27 – 33.
8. Лавров Н.К. Завивание и дробление стружки в процессе резания / Н.К. Лавров – М: Машиностроение, 1971. – 88с.
9. Справочник по технологии резания материалов: в 2 кн. / ред-кол. нем. изд.: Г. Шруп, Т. Штеферле, пер. с нем. В.Ф. Колотенкова [и др.]; под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 1985. – Кн.1. – 616 с.
10. Гостева, Г.К. Методы дробления сливных стружек / Г.К. Гостева, В.Т. Воробьев, Б.Ф. Канашкин // Технология машиностроения: межвуз. сб. – Тула, 1971. – Вып.23: Исследования в области технологии машиностроения и режущего инструмента. – С. 78–89.
11. Гаришин, К.В. О классификации методов дробления стружки / К.В. Гаришин, Л.Б. Быховский, В.В. Потапов // Управление качеством в механосборочном производстве: сб. науч. тр. – Пермь, 1975. – Вып. 2. – С. 102 – 105.
12. Мансырев, И.Г. Методы дробления сливной стружки в процессе резания / И.Г. Мансырев, А.А.Смирнов, И.И. Козарь. – Л.: ЛДНТП, 1983 – 20 с
13. Ильин, В.С. Способы завивания и дробления стружки при работе на токарных станках с программным управлением: технологические рекомендации / В.С. Ильин, А.С. Кондратов, Б.Н.Бубнов. – Науч.-исслед. ин-т технологии и орг. пр-ва НИАТ, [Б.м.], 1975. –24 с.
14. Захаров, Ю.Е. Полезные вибрации в машиностроении / Ю.Е.Захаров, В.Т. Гарбузюк – Тула: Приокское кн. из-во, 1970. – 112 с.
15. Калдр, С. Механизм дробления стружки / С. Калдор, А. Бер, Е. Ленц // Конструирование и технология машиностроения; пер. с англ., 1979. – Т101. – №3. – С. 92–102.
16. Управление контактными процессами для обеспечения процесса стружкодробления и повышения стойкости инструмента. / О.В. Кретинин [и др.]; под ред. Н.В. Гарапова. – Центр. науч.-исслед. ин-т «Румб», 1990. – 68 с.
17. Кумабэ, Д. Вибрационное резание / Д. Кумабэ. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
18. Козочкин, М.П. Особенности стружкообразования при лезвийной обработке с ультразвуковыми вибрациями / М.П. Козочкин, Н.В. Солис-Пинарготе // Машиностроитель. – 2011. – № 2. – С. 29–35.
19. Пискунов, Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления для вузов: учеб. пособие для вузов: в 2 т / Н.С. Пискунов. – [и др.]; под общ. ред: А.Д. Корчемкина. – М.: НИИТавтопром, 1995.
20. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

#### References

1. Zorev N.N., Voprosy mekhaniki protsessa rezaniya metallov [Questions of mechanics of metal cutting process]. Mashgiz Publ, 2016 – 368 p.
2. Zorev N N., Fetisova Z. M. Obrabotka rezaniem tugoplavkikh splavov [Cutting of refractory alloys]. Mashinostroenie Publ, 2016 – 227 p.
3. Issledovanie vibratsii pri obrabotke na stankakh rezaniem [Investigation of vibrations during processing on cutting machines]. Sbornik pod red. akad. Dikushina V. I, prof. Reshetova D. N. Mashgiz Publ, 2018 – 294 c.
4. Voronin A. A, Markov A. I. Vliyanie ul'trazvukovykh kolebaniy na protsess rezaniya zharoprochnykh splavov [Influence of ultrasonic vibrations on the cutting process of heat-resistant alloys]. Stanki i instrument Publ, 1960, № 11. pp. 34-47
5. Granovskii G. I. O stoikosti instrumenta kak ob iskhodnom parametre dlya raschetov rezhimov rezaniya [About tool life as an initial parameter for calculating cutting modes]. «Vestnik mashinostroeniya», 1965. – pp.59-64
6. Dinamika protsessa rezaniya [Dynamics of the cutting process]. Sbornik ENIMS. Mashgiz Publ., 1956 – 158p.
7. Zakharov Yu. E., Baranov V. N. Gidravlicheskie i elektro- gidravlicheskie vibratory dlya tekhnologicheskikh tselei v mashinostroenii [Hydraulic and electro-hydraulic vibrators for technological purposes in mechanical engineering]. Izvestiya vuzov. Mashinostroenie Publ., 1961, № 5, - pp. 27 – 33.
8. Lavrov N.K. Zavivanie i droblenie struzhki v protsesse rezaniya [Curling and crushing chips during the cutting process] / N.K. Lavrov – М: Mashinostroenie, 1971. – 88p.
9. Spravochnik po tekhnologii rezaniya materialov: v 2 kn. [Handbook of material cutting technology: in 2 b.] / red-kol. nem. izd.: G. Shrup, T. Shtefelerle, per. s nem. V.F. Kolotenkova [i dr.]; pod red. Yu.M. Solomentseva. – М.: Mashinostroenie Publ, 1985. – В.1. – 616 p.
10. Gosteva, G.K. Metody drobleniya slivnykh struzhek [Methods for crushing drain chips] / G.K. Gosteva, V.T. Vorob'ev, B.F. Kanashkin // Tekhnologiya mashinostroeniya: mezhvuz.Publ. – Tula, 1971. – Vyp.23: Issledovaniya v oblasti tekhnologii mashinostroeniya i rezhushchego instrumenta. – pp. 78–89.
11. Garishin, K.V. O klassifikatsii metodov drobleniya struzhki [On the classification methods of crushing the chips] / K.V. Garishin, L.B. Bykhovskii, V.V. Potapov // Upravlenie kachestvom v mekhanosborochnom proizvodstve: Publ – Perm', 1975. – pp. 102 –105.
12. Mansyrev, I.G. Metody drobleniya slivnoi struzhki v protsesse rezaniya [Methods for crushing drain chips in the cutting process] / I.G. Mansyrev, A.A.Smirnov, I.I. Kozar'. – L.: LDNTP Publ., 1983 – 20 p
13. Il'in, V.S. Sposoby zavivaniya i drobleniya struzhki pri rabote na tokarnykh stankakh s programmym upravleniem [Methods for Curling and crushing chips when working on lathes with software control]: tekhnologicheskie rekomendatsii / V.S. Il'in, A.S. Kondratov, B.N.Bubnov. – Nauch.-issled. in-t tekhnologii i org. pr-va NIAT. Publ., 1975. –24 p.



14. Zakharov, Yu.E. Poleznye vibratsii v mashinostroenii [Useful vibrations in mechanical engineering] / Yu.E. Zakharov, V.T. Garbuzyuk – Tula: Priokskoe kn. iz-vo Publ., 1970. – 112 p.
15. Kaldor, S. Mekhanizm drobleniya struzhki [The mechanism of chip breakage] / S. Kaldor, A. Ber, E. Lents // Konstruirovaniye i tekhnologiya mashinostroeniya Publ.; per. s angl., 1979. – T101. – №3. – pp. 92–102.
16. Upravlenie kontaktnymi protsessami dlya obespecheniya protsessa struzhkodrobleniya i povysheniya stoikosti instrumenta [Control of contact processes to ensure the chip breaking process and increase tool life.] / O.V. Kretinin [i dr.]; pod red. N.V. Garapova. – Tsent. nauch.-issled. in-t «Rumb» Publ., 1990. – 68 p.
17. Kumabe, D. Vibratsionnoe rezanie [Vibration cutting] / D. Kumabe. – M.: Mashinostroenie Publ., 1985. – 424 p.
18. Kozochkin, M.P. Osobennosti struzhkoobrazovaniya pri lezviinoy obrabotke s ul'trazvukovymi vibratsiyami [Features of chip formation during blade processing with ultrasonic vibrations] / M.P. Kozochkin, N.V. Solis-Pinargote // Mashinostroitel' Publ.. – 2011. – № 2. – pp. 29–35.
19. Piskunov, N.S. Differentsial'noye i integral'noye ischisleniya dlya vtuzov [Differential and integral calculus for higher education institutions]: ucheb. posobie dlya vtuzov: v 2 t / N.S. Piskunov. – [i dr.]; pod obshch. red: A.D. Korchemkina. – M.: NIITavtoprom Publ., 1995.
20. Inzheneriya poverkhnosti detalei [Surface engineering of parts] / pod red. A.G. Suslova. – M.: Mashinostroenie Publ., 2008. – 320 p.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Александр Николаевич Синько**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация, Карагандинский государственный технический университет, Казахстан, Караганда, 100012, пр. Н. Назарбаева, 56, e-mail: sinko1947@mail.ru

**Alexander N. Sin'ko**, Ph.D. (Eng), associate professor, associate professor of the department technological equipment, mechanical engineering and standardization, Karaganda State Technical University, Kazakhstan, Karaganda, 100012, 56 N. Nazarbayev Ave., e-mail: sinko1947@mail.ru

**Татьяна Юрьевна Никонова**, кандидат технических наук, доцент, исполняющий обязанности доцента кафедры технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация, Карагандинский государственный технический университет, Казахстан, Караганда, 100012, пр. Н. Назарбаева, 56, e-mail: nitka82@list.ru

**Tatyana Yu. Nikonova**, Ph.D. (Eng), Associate Professor, Acting Associate Professor of the Department of Technological Equipment, Mechanical Engineering and Standardization, Karaganda State Technical University, Kazakhstan, Karaganda, 100012, 56 N. Nazarbayev Ave., e-mail: nitka82@list.ru

**Василий Викторович Юрченко**, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация, Карагандинский государственный технический университет, Казахстан, Караганда, 100012, пр. Н. Назарбаева, 56, e-mail: juvv76@mail.ru

**Vasily V. Yurchenko**, Dr. Sci. (Eng), Head of the Department of Technological Equipment, Engineering and Standardization, Karaganda State Technical University, Kazakhstan, Karaganda, 100012, 56 N. Nazarbayev Ave., e-mail: juvv76@mail.ru

**Арман Кариевич Матешов**, докторант технических наук, старший преподаватель кафедры технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация, Карагандинский государственный технический университет Казахстан, Караганда, 100012, пр. Н. Назарбаева, 56, e-mail: makashka\_m@mail.ru

**Arman K. Mateshov**, Ph.D. (Eng), Senior Lecturer, Department of Technological Equipment, Engineering and Standardization, Karaganda State Technical University of Kazakhstan, Karaganda, 100012, 56 N. Nazarbayev Ave., e-mail: makashka\_m@mail.ru

**Илья Алексеевич Марченко**, студент-магистр кафедры технологическое оборудование, машиностроение и стандартизация, Карагандинский государственный технический университет Казахстан, Караганда, 100012, пр. Н. Назарбаева, 56, e-mail: mr.marchenko.ilya@gmail.com

**Ilya A. Marchenko**, master-student of the department technological equipment, mechanical engineering and standardization, Karaganda State Technical University of Kazakhstan, Karaganda, 100012, 56 N. Nazarbayev Ave., e-mail: mr.marchenko.ilya@gmail.com



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) <http://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. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
5. 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**