

# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

10011010011011111001010011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010001010101  
00110101101100111000100111001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010  
10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110  
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100  
0011010100110100100001011010010101000100100001111100110011001101101011001110000001110010100101  
11011100110010101111001010101001010011010011100010110010100110010101111001010111100101101001010  
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001  
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100  
00101001110011010011110001010010101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010

№ 4 (42) Т.1 2018



**Труды  
Санкт-Петербургского  
государственного морского технического университета**



# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 (42) Т.1 2018 [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)

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

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

## Главный редактор:

**Н.В. Никитин, д.т.н., профессор**

## Редакционный Совет

### Сопредседатели

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

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

### Члены Совета

Е.М. Апполонов, д.т.н. главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

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

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

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

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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

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

## Редакционная коллегия

### Заместители главного редактора

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

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

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

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

### Члены Редколлегии

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

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

Ю.А. Власов, к.ф.-м.н. преподаватель, Флоридский

Международный Университет, Майами, США

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

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

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

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

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

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

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

**Периодичность издания** — 4 номера в год

Журнал включен в систему Российского индекса

научного цитирования (РИНЦ) <http://vak.ed.gov.ru>

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

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

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

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

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

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

**Телефон/факс +7 (812) 513-04-51**

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

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

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

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

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

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

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

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова



# MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 4 (42) V.1 2018 www.morintex.ru ISSN 2073-7173, ISSN 2588-0233

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

## Chief Editor:

N. V. Nikitin, Doctor of Engineering, Professor

## Editorial Board

### Co-chairmen

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

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

## Council Members

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

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

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

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

Ogai S.A., PhD, Associate professor, Rector, Maritime state university named Admiral Nevelskoi

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

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

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

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

## Editorial Staff

### Deputy Chief Editors

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

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

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

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

### Members of Editorial Staff

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### Publication frequency — 4 issues per year

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

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

Manuscripts are to be submitted to the editorial office in electronic form (on CD or via E-mail: [mit-journal@mail.ru](mailto:mit-journal@mail.ru))

Founder-Publisher: Research Centre "Marine Intelligent Technologies"

**Registration Certificate:** ПИ № ФС77-32382 of 09.06.2008, Эл № ФС72-3345

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

120121, Russian Federation

Phone/fax +7 (812) 513-04-51

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

The journal is included into the list of periodicals recommended for publishing doctoral research results <http://vak.ed.gov.ru>

Printed in the Printing-House of Research Centre "Marine Intelligent Technologies"

Authors and advertisers are responsible for contents of information and advertisement materials as well as for use of information not liable to publication in open press. Reprinting is allowed only with permission of the editorial office.

Opinion of editorial staff and editorial board may not coincide with those of the authors of publications

### Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

EDITORIAL BOARD of the Scientific Journal «Marine Intellectual Technologies» bases its work, in particular, on the guidelines of the Committee of Publication Ethics, as well as on the practices of influential international journals and publishers.

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

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova



**ТРУДЫ**  
**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО**  
**МОРСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**





# 51 центральный конструкторско-технологический институт судоремонта

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

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

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

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

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

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



## СОДЕРЖАНИЕ

О журнале.....	стр 9
----------------	----------

## КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

<b>Крыжевич Г.Б.</b> Стыковочные устройства для монтажа верхних строений на опорные основания морских нефтегазодобывающих платформ.....	11
<b>Портной А.С., Зуева Е.С.</b> Концепция риска в обеспечении безопасности морского нефтегазового Комплекса.....	18

## ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

<b>Крыжевич Г.Б., Рыбалко Т.Р.</b> Анализ собственных частот и форм колебаний самоподъемных плавучих буровых установок с учетом упругих свойств грунта.....	25
<b>Семенова В.Ю., Аунг Мьо Тхант</b> . Определение сил волнового дрейфа, возникающих при совместной качке двух судов на нерегулярном волнении в условиях мелководья.....	32
<b>Борисов Р.В., Лузянин А.А.</b> О нормировании ускорений при качке судов с избыточной устойчивостью.....	42
<b>Рождественский К.В.</b> Обтекание малопогруженного подводного крыла в диапазоне критических значений числа Фруда.....	49
<b>Мелконян А.Л., Николаев Д.А.</b> Квазиодномерные модели для анализа параметров вибрации судового корпуса на ранних стадиях его проектирования.....	56
<b>Семенова В.Ю., Киав Тхура</b> Определение амплитудно-частотных характеристик поперечной качки судна, вызываемых нелинейными силами обусловленными суммой и разностью частот на бихроматическом волнении.....	63
<b>Лавриненко А.В., Ермолаева Е.В., Франк М.О., Овчинников К.Д., Тряскин Н.В.</b> Выбор формы корпуса автономного необитаемого надводного аппарата с помощью современных средств вычислительной гидродинамики.....	71
<b>Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А.</b> Развитие методов подструктурного анализа для исследований локальных форм отказа корпусных конструкций из полимерных композиционных материалов.....	76
<b>Яковлев А.Ю.</b> Метод расчета тянущей винто-рулевой колонки и его использование для решения практических задач.....	83

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

<b>Апалько Т.А., Гайкович А.И., Най Мьо Хлаинг</b> Определения буксировочной мощности для барже-буксирных комплексов для союза Мьянма.....	90
<b>Гайкович А.И., Никитин Н.В.</b> Статистическое исследование характеристик надводных кораблей основных классов.....	96

## ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

<b>Гоголюхина М.Е., Мамедова Л.Э.</b> О возможностях освоения альтернативных рынков сбыта судостроительным предприятием.....	100
<b>Хуснуллина А.Р.</b> Обеспечение экологической безопасности морских акваторий при эксплуатации портовых топливных терминалов.....	106

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

<b>Корнев А.С., Кузнецов В.И., Сеньков А.П., Червяков В.В.</b> Вариант построения судовой единой электроэнергетической системы с преобразователями частоты на базе трехуровневого автономного инвертора напряжения.....	110
<b>Аполлова А.В., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Шаманов Н.П.</b> Экспериментальные исследования системы пассивного отвода тепла на Приморской учебно-научной базе СПбГМТУ.....	115
<b>Хруцкий О.В., Равин А.А., Медведев В.В.</b> К вопросу ошибки прогноза технического состояния объектов морской техники.....	124
<b>Равин А.А., Медведев В.В., Хруцкий О.В.</b> Оценка эффективности прогнозирования технического состояния оборудования.....	129

<b>Медведев В.В., Хруцкий О.В., Равин А.А.</b> Краткий обзор и анализ примеров имитационного моделирования судовых энергетических установок и их элементов.....	133
<b>Пейч Н.Н., Шаманов Д.Н., Гравшин А.В.</b> Исследование влияния высоты циркуляционного тракта на гидравлические характеристики систем пассивного отвода тепла морских атомных установок....	140
<b>Румб В.К., Хоанг Ван Ты</b> Упрощенный подход к определению гидродинамических параметров упорных подшипников судовых валопроводов.....	144
<b>Гаврилов В.В., Медведев В.В., Богачёв Д.Д.</b> Совершенствование рабочего процесса судового двухтопливного двигателя.....	150
<b>Минасян М.А., Аунг Мьо Тхант., Минасян А.М.</b> Экспериментальная оценка вибрационной эффективности общей системы амортизации дизеля 2Ч 8,5/11 с гидротормозом, смонтированные на общей – несущей раме с торообразными канатными виброизоляторами.....	156

#### ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

<b>Легуша Ф.Ф., Олейник М.М., Лисенков Н.М., Наливкин П.В., Чижов В.Ю.</b> Физические эффекты, возникающие при взаимодействии акустической добавки к температуре среды со сферической полостью, взвешенной в жидкости.....	162
<b>Легуша Ф.Ф., Рытов Е.Ю., Сетин А.И.</b> Колебания температуры в бегущей плоской звуковой волне	167
<b>Мурга В.А., Клубина К.А.</b> Вынужденные колебания капли сжимаемой жидкости в звуковом поле...	171

#### УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

<b>Орлов П.М., Сидоров В.М., Сиек Ю.Л., Чичерин И.А.</b> Принципы модернизации экспериментальной установки для испытаний гребных винтов.....	176
--	-----

#### ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

<b>Нечаев Ю. И.</b> Проблемы повышения активности обучения при построении курса лекций ГМТУ «Компьютерная математика – прикладные аспекты».....	183
<b>Нечаев Ю. И.</b> Мультиязычный комплекс компьютерной математики: интеллектуальная поддержка теоретических решений в процессе приобретения знаний.....	191
<b>Нечаев Ю. И., Петров О. Н.</b> Концепция динамической непотопляемости – от классической модели к новой интерпретации.....	198
<b>Янчин И. А., Петров О. Н.</b> Двухкомпонентный параллельный генетический алгоритм построения оптимального и безопасного маршрута судна.....	206
<b>Звягин К.Н., Войткунская А.Я., Мальцев Д.Д.</b> Третьичная обработка радиолокационной информации с использованием вейвлет-преобразования.....	213
<b>Воропаев А.О., Горбунов А.В.,</b> Аналитическое исследование возможности применения современных средств топологической оптимизации для изделий судового машиностроения.....	218
<b>Никонов С.А., Матюков А.А., Островская Н.В.</b> Особенности виртуального моделирования динамических процессов в механических системах с удерживающими связями с помощью пакета «adams».....	223
<b>Звягин П.Н., Степанов М.А., Звягина Т.Л.</b> Распознавание изображений моделированного льда при помощи метода разрастания.....	229

CONTENTS

About journal .....	page 9
---------------------	-----------

SHIP BUILDING

<b>Gennady B. Kryzhevich</b> Mating units for installation of top structures on substructures of offshore oil-and-gas producing platforms.....	11
<b>Aleksey S. Portnoy, Ekaterina S. Zueva</b> Risk concept in ensuring safety of marine oil and gas complex .....	18

THEORY OF SHIP AND STRUCTURES

<b>Gennady B. Kryzhevich, Trifon R. Rybalko</b> Analysis of natural frequencies and vibration modes of jack-up floating drilling rigs with account of soil elastic properties.....	25
<b>Viktoriya Yu. Semenova, Aung Myo Thant</b> The determination of the wave drift forces acting on two ships during their coupled motions on the irregular waves in the shallow water.....	32
<b>Rudolf V. Borisov, Alexander A. Luzjanin</b> About normalization of accelerations during the motions of vessels with excessive stability.....	42
<b>Kirill V. Rozhdestvensky</b> Flow past a hydrofoil at shallow submergence in the range of critical froude numbers .....	49
<b>Armen L. Melkonian, Dmitry A. Nikolaev</b> Quasione-dimensional models for the analysis of parameters of vibration of the ship case at early stages of his designing.....	56
<b>Viktoriya Yu. Semenova, Kyaw Thura</b> The determination of of amplitude frequency characteristics of lateral motions of the ship due to the sum and difference of frequencies on the bichromatic waves.....	63
<b>Akim V. Lavrinenko, Elena V. Ermolaeva, Maksim O. Frank, Kirill D. Ovchinnikov, Nikita V. Tryaskin</b> The selection of unmanned surface vehicle hull form by computational fluid dynamics.....	71
<b>Vladimir A. Korshunov, Dmitry A. Ponomarev, Alexander A. Rodionov</b> The development of methods submodeling analysis of local failure forms of composite hull structures.....	76
<b>Aleksey Yu. Yakovlev</b> Calculation method of podded propulsor characteristics and its application for the practical tasks.....	83

SHIP DESIGNING AND STRUCTURE

<b>Tatyana A. Apalko, Aleksandr I. Gaikovich, Nay Myo Hlaing</b> Definitions of towing capacity for barge-towing systems for the union of Manmar.....	90
<b>Aleksandr I. Gaikovich, Nikolay V. Nikitin</b> Statistical study of the characteristics of the main class adwater craft.....	96

SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION

<b>Maria E. Gogolukhina, Leyla E. Mamedova</b> Opportunities of a Shipbuilding Yard at Non-Conventional Markets.....	100
<b>Aliya R. Khusnullina</b> Ensuring ecological safety of eater areas at operation of port fuel terminals.....	106

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)

<b>Aleksandr S. Kornev, Viktor I. Kuznetsov, Aleksey P. Sen'kov, Viktor V. Chervyakov</b> The considered version of construction of a ship single electric power system with frequency converters based on a three-level autonomous voltage inverter.....	110
<b>Anastasia V. Apollova, Vyacheslav V. Kozhemyakin, Dmitry N. Shamanov, Nikolay P. Shamanov</b> Experimental investigations of the passive heat removal system at the educational-scientific base SMTU of St.Petersburg in Primorsk.....	115
<b>Oleg V. Khrutsky, Alexandr A. Ravin, Valery V. Medvedev</b> On the issue of forecasting errors of the technical condition of marine facilities.....	124
<b>Alexandr A. Ravin, Valery V. Medvedev, Oleg V. Khrutsky</b> Evaluation of the effectiveness of forecasting technical condition of equipment.....	129
<b>Valery V. Medvedev, Oleg V. Khrutsky, Alexandr A. Ravin</b> Brief overview and analysis of examples of the imitation modeling of ship-energy installations and their elements.....	133
<b>Nikolay N. Peich, Dmitriy N. Shamanov, Alexander V. Gravshin</b> Investigation of circulation loop height influence on hydraulic characteristics of passive heat removal system of marine nuclear power plants.....	140



<b>Viktor K. Rumb, Hoang Van Tu</b> A simplified approach to the determination of the hydrodynamic parameters of thrust bearings in ship propulsion systems.....	144
<b>Vladimir V. Gavrilov, Valery V. Medvedev, Dmitrij D. Bogachev</b> Improvement of working process in marine dual-fuel engine.....	150
<b>Minas A. Minasyan, Aung Myo Thant, Armen M. Minasyan</b> Experimental evaluation of the vibration efficiency of the general system of amortization of a diesel engine 2CH 8.5/11 with a hydraulic system mounted on a general supporting frame with toroidal wire rope vibration isolators.....	156

**PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION**

<b>Fedor F. Legusha, Mariya M. Oleinick, Nikolay M. Lisenkov, Pavel V. Nalivkin, Vitaliy Y. Chizhov</b> Physical effects, arising at the interaction of the acoustic additive to the temperature of the medium with a spherical cavity, weighted in the liquid.....	162
<b>Fedor F. Legusha, Evgeny Yu. Rytov, Alexander I. Setin</b> Oscillations of temperature in a traveling plane sound wave.....	167
<b>Valeriy A. Murga, Kseniya A. Klyubina</b> Forced oscillations of compressible liquid drop in sound field...	171

**CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION**

<b>Pavel M. Orlov, Vitaliy M. Sidorov, Yuri L. Siek, Igor A. Chicherin</b> Principles of propeller open-water testing facility modernization for test screws.....	176
---	-----

**NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS**

<b>Yuri I. Nechaev</b> The problem of increasing the activity of learning in constructing the course of lectures «The computer mathematics – applied aspects» in SMTU.....	183
<b>Yuri I. Nechaev</b> Multimodeling complex of computer mathematics: intellectual support of theoretical decisions in the course of acquisition of knowledge.....	191
<b>Yuri I. Nechaev, Oleg N. Petrov</b> The concept of dynamic unsinkability – from classical model to new interpretation.....	198
<b>Ivan A. Yanchin, Oleg N. Petrov</b> Two-component parallel genetic algorithm for planning safe and optimal route for a ship.....	206
<b>Konstantin N. Zvyagin, Anna Ja. Voitkunskaia, Daniil D. Maltsev</b> Tertiary treatment of radar information using wavelet transformation.....	213
<b>Alexandr O. Voropayev, Artyom V. Gorbunov</b> Analytical research the possibility of using modern means of topology optimization for marine engineering products.....	218
<b>Semen A. Nikonov, Alexandr A. Matukov, Nadezda V. Ostrovskaya</b> The virtual dynamic modeling features in mechanical systems with the holding connections by means of an «ADAMS».....	223
<b>Petr N. Zvyagin, Maxim A. Stepanov, Tatiana L. Zvyagina</b> Model ice images recognition by the region growing method.....	229

**О ЖУРНАЛЕ**

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

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

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

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

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2014 года и с № 3(25) 2014 полные выпуски размещены на сайте [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)

Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2015 года и с № 4(30) 2015 полные выпуски размещены в научной электронной библиотеке.

**Подписной индекс 99366 в «Межрегиональном агентстве подписки» (МАП).**

Журнал распространяется посредством подписки в МАП и в редакции, а также на выставках, конференциях и симпозиумах.

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

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

## ABOUT JOURNAL

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### Basic Magazine Trends

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

**КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ**

УДК 629.563.21.002.72.39.4

**СТЫКОВОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ МОНТАЖА ВЕРХНИХ СТРОЕНИЙ  
НА ОПОРНЫЕ ОСНОВАНИЯ МОРСКИХ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ  
ПЛАТФОРМ**

**Геннадий Брониславович Крыжевич**  
профессор, доктор технических наук,  
профессор кафедры строительной механики корабля  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: G\_Kryzhevich@ksrc.ru

**Аннотация**

В статье выполнен анализ конструкций стыковочных устройств для монтажа верхних строений на опорные основания морских нефтегазодобывающих платформ, а также технологий выполнения монтажных работ с их помощью. Установлено, что эффективность выполнения монтажных операций по посадке моноблоков верхних строений на опорные основания платформ в морских условиях в значительной степени зависит от используемых конструктивных и технологических решений. Показаны конструктивные различия устройств, используемых на стационарных сооружениях и на плавучих полупогружных платформах. Предложены новые технические решения для стыковочных устройств, используемых при морском монтаже стационарных платформ с металлическими опорными колоннами и с железобетонными опорными блоками. Особое внимание уделено совершенствованию конструкций опорных устройств для стационарных сооружений, эксплуатируемых в сейсмоопасных акваториях, а также стыковочных устройств, обеспечивающих принудительное совмещение стыкуемых поверхностей верхнего строения и опорных оснований за счёт упругого деформирования конструкций. Благодаря предложенным монтажным устройствам обеспечиваются высокая надежность и сейсмостойкость стационарного сооружения, низкие значения внутренних усилий в монтажных соединениях и невысокая материалоемкость сооружения в целом, а также высокая технологичность и малая стоимость монтажа.

**Ключевые слова:** морские стационарные платформы, плавучие полупогружные установки, морские операции по монтажу нефтегазодобывающих платформ, стыковочные устройства морских платформ.

**MATING UNITS FOR INSTALLATION OF TOP STRUCTURES ON  
SUBSTRUCTURES OF OFFSHORE OIL-AND-GAS PRODUCING  
PLATFORMS**

**Gennady B. Kryzhevich**  
the professor, Dr.Sci.Tech.,  
the professor of department of ship strength  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation

**Abstract**

The paper analyses the structure of mating units for installation of top structures on substructures of offshore oil-and-gas producing platforms, as well as technologies of installation work with their use.. It was found that effectiveness of installation operations of setting monoblocks of top structures on substructures of platforms in sea conditions depends to a large degree on the structural and technological solutions used. The structural differences of the devices used for fixed structures and for floating semi-submerged platforms are shown. New engineering solutions for the mating devices used for sea installation of fixed platforms with metallic base legs and with reinforced concrete supporting blocks are proposed. Special attention is paid to perfecting structures of supporting devices for fixed platforms operating in earthquake-prone water areas, as well as to mating devices providing forced superposition of mated surfaces of top structures and superstructures owing to elastic deformation of the structures. Thanks to the proposed installation devices, high reliability and seismic stability of fixed structures, low values of inner forces in field connections and low material consumption of the structures as a whole, as well as installation high manufacturability and low cost are provided.

**Key words:** offshore fixed platforms, floating semisubmersible units, sea operation on installation of oil-and-gas producing platforms, mating units of offshore platforms

### Введение

Наплавный способ проведения морских операций (по другому, способ надвига на плаву) используется для монтажа и демонтажа плавучих и стационарных платформ более 30 лет [1]. Он не требует использования кранов большой грузоподъемности и поэтому более предпочтителен, когда вес верхних строений превышает 10 тыс. тонн. Его суть состоит в том, что на месте монтажа платформы транспортное плавсредство (баржа), перевозящее верхнее строение (ВС), располагается между колоннами раскрепленного на акватории опорного основания (ОО). После того как судно пришвартовано выполняется предварительное наведение стыкуемых блоков (совмещение опор ВС с опорами основания) путем позиционирования в горизонтальной плоскости одного блока относительно другого. Для наведения ВС на ОО используются подруливающие устройства, буксиры, лебедки или комбинация этих технических средств. Наведение производится по реперным точкам или на основе индикации, обеспечиваемой оптическими или лазерными системами. В отечественной практике способ надвига на плаву был реализован на строительстве морских стационарных платформ (СП) на месторождении Азери-Чираг-Гюнешли в Азербайджанском секторе Каспия, при строительстве ледостойких стационарных платформ на месторождениях им. Корчагина и Филановского в северной части Каспия, при строительстве плавучей полупогружной буровой установки (ППБУ) "Полярная звезда", монтаже ВС гравитационной платформы "Лунская" на шельфе Сахалина, демонтаже ВС с TLP "Hutton" и т.д.

Проведение погрузочно-разгрузочных операций осуществляется путём притапливания плавсредства (за счёт принятия балласта) и путём всплытия плавсредства (за счёт откачки балласта).

Операция по посадке наплавным способом моноблока ВС на ОО обычно проводится в три этапа [2-5].

*Первый этап* предусматривает ввод транспортного средства с моноблоком ВС на борту в створ опорных колонн (блоков) СП, либо в створ стабилизирующих колонн водоизмещающего плавучего основания ППБУ.

Ввод и передвижение в створе транспортного средства с ВС на борту осуществляется медленно до положения, при котором обеспечивается в наибольшей мере совпадение контактирующих поверхностей (точнее, соосность этих конических поверхностей) верхних (закрепленных на ВС) и нижних (закрепленных на ОО) частей стыковочных устройств (СУ).

*Второй этап* предусматривает фиксацию системы "транспортное средство-ВС" в створе, в положении, обеспечивающем в наибольшей мере соосность стыковочных узлов ВС и ОО. Успешное проведение этапа связано с фиксацией системы "транспортное средство-ВС" в створе стабилизирующих колонн ППБУ, для чего предварительно осуществляется позиционирование судна на рабочей точке с помощью подруливающих устройств. При этом возможно также подтягивание и продвижение баржи в створе опорных колонн, которое обеспечивается с помощью швартовых

канатов и путем использования буксирных судов, удерживающих систему от перемещений в продольном направлении. Опорное основание ППБУ обычно фиксируется на рабочей точке путем постановки плавучего ОО на бочки, которые с помощью бриделя соединяются с мёртвыми якорями. Рым на верхней части бочки обеспечивает крепление швартова ОО.

*Третий этап* предусматривает посадку ВС на ОО и вывод транспортного плавсредства из межопорного створа. Операция по посадке проводится путём баллаستировки, что обеспечивает погружение транспортного плавсредства и последующую стыковку монтажных узлов. В результате вес ВС полностью переносится на ОО, и тем самым осуществляется посадка ВС на опоры.

Путём дальнейшей балластировки транспортного плавсредства обеспечивается вертикальный зазор между ВС и плавсредством, что позволяет ему безопасно выходить из межопорного створа.

Безопасное проведение операций по посадке ВС на опорные основания предопределяет необходимость их оснащения специальными СУ, которые являются основными средствами обеспечения сборки платформ из моноблоков наплавным способом в морских условиях. Целью данной работы является анализ особенностей конструкции использованных устройств и разработка предложений по совершенствованию конструктивного оформления. При достижении этой цели необходимо учитывать конструкцию ОО, которая в зависимости от типа платформы, может представлять собой стационарно закреплённый опорный блок (ОБ) СП, либо плавучее ОО ППБУ.

Как отмечено ранее, СУ состоят из двух сегментов или конусных элементов (верхнего и нижнего), которые устанавливаются на сопрягаемых поверхностях соединяемых моноблоков (ВС и ОО) морских платформ. Количество СУ определяется типом нефтяного сооружения. В случае стационарной платформы, количество стыковочных устройств обычно соответствует количеству стоек ОБ СП. В случае плавучей платформы, количество стыковочных устройств определяется числом стабилизирующих колонн ППБУ.

Поскольку остаточные напряжения, возникающие в процессе сборки и сварки металлоконструкций моноблоков, могут достигать величин порядка предела текучести, то любая транспортная операция может приводить к появлению как упругих, так и заметных остаточных деформаций ВС и ОО, что, в свою очередь, приводит к появлению дополнительных отклонений от номинальных размеров, существенно превышающих технологические допуски. Поэтому основная роль СУ должна сводиться к нивелированию неблагоприятного влияния неточности изготовления и дополнительного деформирования, возникающего в супертяжеловесных моноблочных конструкциях в процессе выполнения погрузочно-транспортных операций.

СУ обеспечивают принудительное совмещение стыкуемых поверхностей ВС и ОО за счёт упругого (а иногда и упругопластического) деформирования конструкций. Совмещение происходит, главным образом, благодаря относительно небольшим изменениям формы и размеров стыкуемых



поверхностей, происходящим под действием сил веса верхних строений, переносимых постепенно с транспортного средства на ОО.

Эффективность выполнения монтажных операций по посадке моноблоков ВС на ОО платформ в морских условиях в значительной степени зависит от конструкции СУ. В практике морского монтажа платформ используются устройства различной конструкции. Эти конструкции пока не стандартизованы и часто подвергаются совершенствованию.

При монтаже моноблочной конструкции ВС на плавучее ОО ППБУ применяют более сложные СУ. При монтаже моно/мегаблочных конструкций ВС на стационарно закреплённые гравитационные платформы, расположенные в сейсмоопасных зонах (о. Сахалин), используются специальные СУ скользящего типа.

Ниже рассматриваются конструкции монтажно-стыковочных устройств, которые использовались при монтаже моноблочных конструкций ВСП, предназначенных для стационарных платформ месторождения Азери-Чираг-Гюнешли (Азербайджанский сектор Каспия), ППБУ "Полярная звезда" и других объектов.

### 1. Простейшие конструкции стыковых устройств стационарных платформ

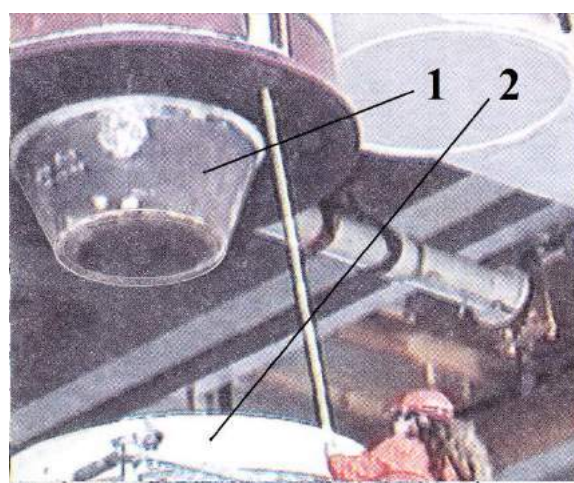
При монтаже моноблочной конструкции ВС на неподвижный ОБ СП, стационарно закреплённый в морском грунте, используются СУ относительно простой конструкции. Так, например, верхняя часть СУ, расположенного на ВС СП "Азери-Чираг-Гюнешли" [1], представляет собой стальную гильзу, в полость которой вмонтирован конусообразный элемент из высокопрочного эластичного полимера, способного выдержать нагрузку до 2000 т (рис. 1). Стальная гильза с помощью сварки приварена к настилу опорной палубы ВС и к балкам подпалубного набора, обеспечивая при этом высокую жёсткость СУ и палубы в целом. Высокопрочный полимерный конус выполняет роль контактного элемента, связывающего ВС и ОБ в единую конструкцию и способствующего демпфированию вибрации ВС.

Нижняя часть СУ – это концевой участок трубной стойки ОБ с полостью, в которую в процессе посадки ВС на ОБ входит конусообразный эластичный демпфирующий элемент [1].

В процессе ввода баржи в створ опорных блоков стыковочные узлы верхнего строения возвышаются над трубчатыми стойками опорных блоков на высоте 1,5 м. Наведение ВС на ОБ, в случае несоосности верхних и нижних частей СУ, сопровождается действием на конусообразный направляющий полимерный элемент действующей боковой силы, смещающей этот элемент в направлении уменьшения несоосности. Такое перемещение вызывает сжатие деформируемого полимерного конусообразного элемента. В результате упругого деформирования уменьшается несоосность верхних и нижних частей СУ, при этом конусообразные полимерные элементы входят в полость трубчатых стоек ОБ и происходит совмещение верхних и нижних посадочных сегментов СУ. После посадки верхнего строения на опорный блок кромки верхнего и нижнего сегментов соединяются круговым стыковым сварным швом.



а



б

Рис. 1. Общий вид стыковочного узла СП [1] при наведении ВС на опорный блок (а) и при опускании ВС на стойки опорного блока (б): 1 - стальная гильза с конусообразным полимерным элементом, приваренная к набору опорной палубы; 2 - концевой участок трубной стойки ОБ.

Недостатком такого технического решения является необходимость изготовления полимерного конуса, которое сложно осуществить в условиях судостроительного предприятия, а также относительно невысокая надёжность узла сварного соединения верхнего и нижнего сегментов СУ. Такой вид узла обычно не используется в практике судостроения. В судовых конструкциях узлы соединения стержневых элементов принято создавать жесткими, обеспечивающими неизменяемость углов пересечения их нейтральных осей при изменении нагруженности узла (от минимальной до максимальной). В связи с этим такое СУ можно рекомендовать только в том случае, когда концевой участок трубной стойки ОБ не испытывает изгиба в процессе эксплуатации. В противном случае рекомендуется использовать альтернативные технические решения.

К ним относится предлагаемая конструкция соединения трубной стойки ОБ с опорной палубой ВС, представленная на рис. 2.

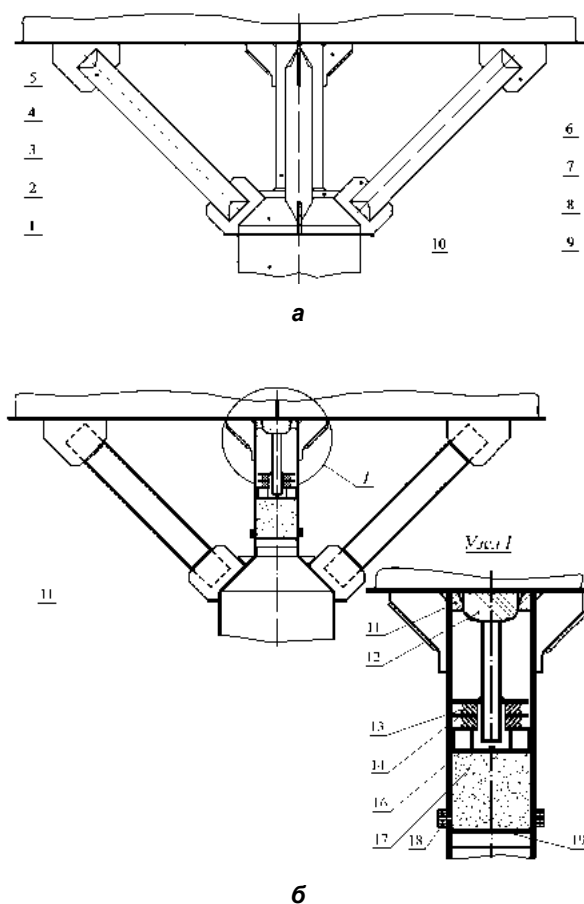


Рис. 2. Конструкция соединения стойки ОБ с опорной палубой ВС: а – вид сбоку; б – разрез вертикальной плоскостью по оси стойки.

С целью снижения горизонтальных усилий, возникающих в процессе стыковки ВС с опорными стойками, и ускорения монтажа предусматривается уменьшение поперечного сечения трубной стойки 1 на верхнем концевом участке. Этот участок выполняется в виде переходного конуса и верхней цилиндрической части с неподвижно соединенным с ней жестким конусным элементом 12 СУ. На опорной палубе в зоне пересечения переборок или других жестких связей приварен верхний конус 11 СУ. В начале монтажа, при опускании ВС на опорные стойки 1 происходит силовое взаимодействие верхнего и нижнего конусов и их смещение друг относительно друга, снижающее обусловленный технологическими факторами эксцентриситет, главным образом, за счет деформирования (изгиба) верхней части стойки 1. После окончания взаимодействия конических поверхностей в контакт вступают цилиндрические поверхности деталей 11 и 12, в результате чего фиксируется взаимное положение этих деталей в горизонтальной плоскости. После передачи около 30% веса ВС на опорные стойки кромки верхнего и нижнего сегментов СУ соединяются круговым стыковым сварным швом. Далее производится с помощью сварки установка книц 7 в месте расположения обшивок переборок или других жестких связей. Эти кницы обеспечивают соединение стоек с опорной палубой. Кроме того для гарантирования надежности соединения и исключения изгиба верхних частей

стоек при действии горизонтальных нагрузок устанавливаются трубчатые раскосы 5, в концах которых имеются прорезы. В них при установке входят brackets 6 и 8, соединяемые сваркой с раскосами. На концах трубчатых раскосов привариваются заглушки. Brackets устанавливаются на стойках до начала монтажа и надежно соединяются сваркой со стойками с помощью полос конической формы 9 и дисковидной формы 10. Монтаж производится при ограниченной интенсивности ветра и волнения [4, 6]. При разработке проекта монтажа производится проверка прочности и устойчивости стоек на действие сил веса ВС.

Целый ряд технологических причин служит причиной появления неравномерности нагружения отдельных стоек ОБ. Для выравнивания усилий, воспринимаемых отдельными стойками, в составе предлагаемой конструкции содержится устройство, включающее сжимаемые эластомерные элементы 13 с высокой податливостью, разделенные между собой стальным подвижным диском 14, способным смещаться в вертикальном направлении. При перемещении конусного элемента 12 приваренный к нему верхний стальной диск воздействует на эластомерные элементы, передающие вертикальное усилие на подвижный поршень 16, вызывающий сжатие песка в камере 17. Благодаря большим упругим перемещениям сжимаемых податливых элементов происходит перераспределение усилий, воспринимаемых отдельными стойками. В процессе посадки ВС на опорный блок производится контроль этих усилий. В случае установления перегрузки какой-либо стойки дальнейшее выравнивание усилий между отдельными стойками возможно путем удаления части песка из камеры 17 [7]. Благодаря устройству дозированной отсыпки песка 18 возможно обеспечить вертикальное перемещение поршня 16 и снижение усилий в перегруженной стойке. Это устройство может быть также полезным при обнаружении недопустимо больших (по условиям сварки) вертикальных зазоров между свариваемыми элементами опорной стойки и опорной палубы ВС.

Предлагаемая конструкция обеспечивает высокую технологичность монтажа, низкие затраты на его осуществление и высокую надежность соединения стоек с ВС.

## 2. Конструкции СУ СП, эксплуатируемых в сейсмоопасных районах

В основу эффективного способа снижения горизонтальных усилий, возникающих в процессе стыковки ВС с опорными блоками стационарного сооружения, положено новое конструктивное решение, основанное на использовании СУ, состоящего из элементов двух типов.

Положение элемента первого типа (рис. 3а) в горизонтальной плоскости не изменяется в процессе стыковки. Этот элемент в СУ содержится в единственном экземпляре. Остальные элементы устройства обладают возможностью их горизонтального смещения при стыковке и окончательная их фиксация производится за счет бетонирования на последней стадии монтажа ВС (рис. 3б). Все элементы стыковочного устройства выполняют одновременно и функции опор верхнего строения.

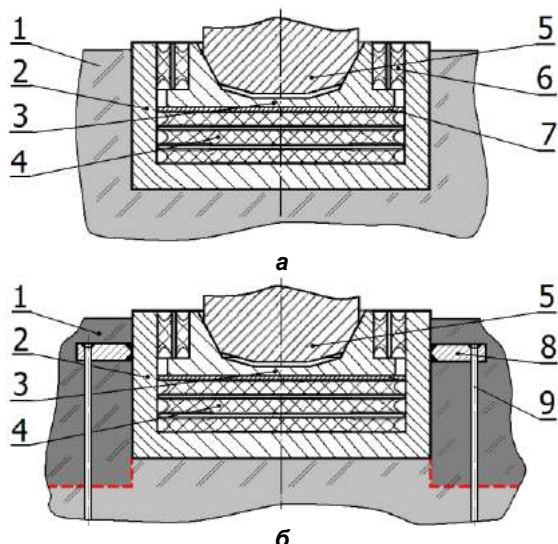


Рис. 3. Схемы элементов стыковочного устройства скользящего типа: а – с фиксированным положением; б – с возможностью горизонтального смещения устройства при стыковке.

Несмещаемый в горизонтальной плоскости элемент (рис. 3а) представляет собой закрепленный в верхней части колонны опорного блока 1 с помощью анкеров стальной стакан 2, в котором расположен нижний конусный сегмент 3. Усилия от веса верхнего строения передаются через верхний конусный сегмент 5 на нижний сегмент. Передача усилий на стакан происходит через деформируемые диски 4 и кольца 6, выполненные из эластомеров (например, из резины). Деформируемые диски 4 имеют канавки по периферии, способствующие свободному сжатию дисков под действием вертикальных сил. Они разделены между собой стальными дисками. Кольца 6 из эластомеров разделены стальным тонкостенным кольцом и имеют канавки по торцам, способствующие деформированию их в радиальном направлении. При сейсмических воздействиях на платформу происходят горизонтальные и вертикальные смещения ОБ относительно ВС, сопровождающиеся деформированием эластомерных элементов 4 и 6, а также скольжением нижнего конусного сегмента 3 по стальному диску 7. В результате такого деформирования и скольжения рассеивается энергия и происходит амортизация ударных сейсмических воздействий и демпфирование вызванных ими колебаний платформы.

С целью снижения горизонтальных усилий, возникающих в процессе стыковки ВС с опорными блоками, и ускорения монтажа предусматривается установка элементов второго типа. Для обеспечения возможности их горизонтального смещения при стыковке стакан 2 может быть снабжен не менее чем четырьмя лапами 8, в которых закреплены стержни 9, соединенные с арматурой железобетонного опорного блока 1. На начальной стадии монтажа ВС на опорный блок верхняя часть блока формируется в виде цилиндрического выступа с опорной площадкой, контур которого показан на рис. 3б красной штриховой линией. Вследствие вызванной технологическими причинами неизбежной несоосности верхнего конусного сегмента 5 с конической поверхностью нижнего сегмента 3 при

посадке ВС будет происходить деформирование стержней 9 и снижение несоосности до предельно малых значений. Одновременно благодаря деформированию податливых элементов 4 будет наблюдаться выравнивание вертикальных усилий, испытываемых различными стыковочными устройствами, поддерживающими ВС и передаваемых верхними сегментами 5 на нижние сегменты 3. На последней стадии монтажа, происходящей после полной передачи веса ВС на опорные блоки, производится бетонирование (установка опалубки, заливка цементным раствором) и окончательное оформление остальной верхней части опорного блока (сечение которой выделено на рис. 3б более темным фоном).

При монтаже ВС на опорные блоки целесообразно использовать один элемент стыковочное устройство с фиксированным положением. Остальные элементы СУ должны обладать возможностью их горизонтального смещения при монтаже.

Благодаря такому способу монтажа обеспечиваются:

- высокая надежность и сейсмостойкость стационарного сооружения;
- низкие значения внутренних усилий в монтажных соединениях и невысокая материалоемкость сооружения в целом;
- высокая технологичность и малая стоимость монтажа.

### 3. Конструкция СУ ППБУ

Для посадки моноблочной конструкции ВС на плавучее ОО ППБУ "Полярная звезда" использовалось специальное стыковочное устройство LMU (leg mating unit) [2-8], состоящее из двух направляющих конусов – верхнего и нижнего. Направляющая конусообразная конструкция за счет вертикальной силы веса ВС способна создавать горизонтальное усилие, и путём деформирования конструкций плавучего опорного основания за счёт изгиба понтонов, стабилизирующих колонн и поперечных раскосов, обеспечивает совмещение конструкции ВС и ОО.

На рис. 4 показана схема конструкции LMU с направляющими конусами. В сечении по оси СУ (рис. 4а) показаны основные силовые конусные элементы 1 и 2, первый из которых (основные параметры приведены на рис. 4б) неподвижно закреплён с помощью сварки на ОО, а второй способен перемещаться в вертикальном направлении в цилиндре 3, закреплённым неподвижно в приваренной к ВС гильзе 4.

При переносе веса ВС с плавсредства на опорное основание и наличии технологических отклонений стыкуемых поверхностей, т.е. при наличии несоосности конусных элементов 1 и 2, равной  $\Delta$ , на элемент 1 действует боковая сила, смещающая элемент 1 в горизонтальном направлении и вызывающая упругое деформирование (изгиб) колонны опорного основания. Благодаря этому происходит уменьшение несоосности  $\Delta$  (вплоть до значений, не превосходящих допустимые по условиям сварки величины) и совмещение стыкуемых (свариваемых) элементов супермодулей. Вследствие особенностей геометрии контактных поверхностей боковое перемещение конусного



элемента 1 сопровождается вертикальным перемещением элемента 2. Такое перемещение вызывает сжатие деформируемых элементов 5, выполненных из низкомолекулярных эластомеров и разделённых между собой смещаемыми в вертикальном направлении дисками 6. При удовлетворительном совмещении в горизонтальном направлении стыкуемых элементов ВС и опорного основания могут иметь место недопустимо большие (по условиям сварки) вертикальные зазоры между свариваемыми элементами. В этом случае выполняется частичное выплавление прокладки 7, выполненной из термопластичного полимерного материала, разогреваемого с помощью электронагревательного элемента 8. Выплавление происходит при открытых отверстиях в крышке 9, неподвижно закреплённой на цилиндре 3.

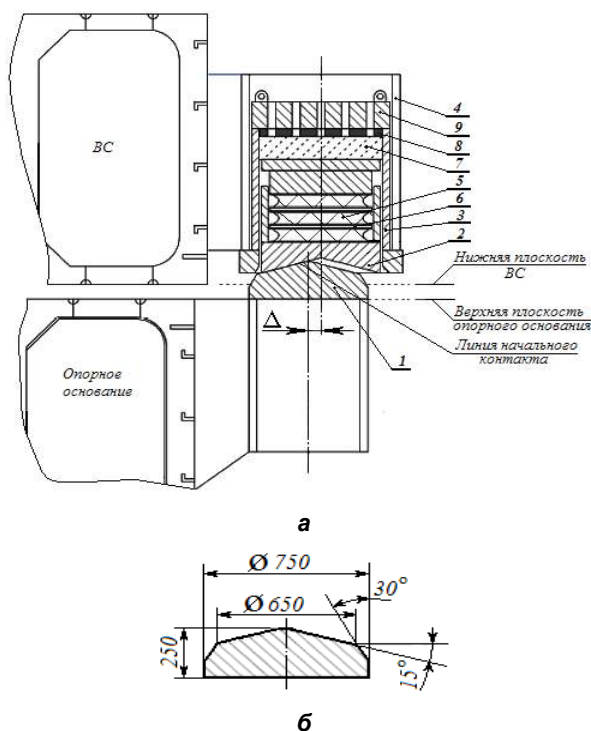


Рис. 4. – Схема конструкции стыкового устройства, верхняя часть которого расположена на верхнем строении, а нижняя – на опорном основании: а – положение частей устройства непосредственно перед стыковкой (перед принудительным совмещением стыкуемых элементов ВС и опорного основания); б – геометрия и размеры конусного элемента нижней части устройства, использовавшегося при монтаже моноблоков ППБУ “Полярная звезда”.

Приведенные выше конструктивно-технологические особенности монтажно-стыковочных устройств, используемых для монтажа моноблоков СП и ППБУ в морских условиях определяют необходимость предъявления достаточно жёстких требований к элементам

системы монтажа в части допустимых максимальных относительных смещений стыкуемых элементов и стыковочных нагрузок. В частности, недопустимо превышение принятой в проекте допустимой несоосности стыкуемых конических поверхностей верхних (устанавливаемых на ВС) и нижних (устанавливаемых на ОО) частей стыковочного устройства. При оценке несоосности должны быть учтены технологические допуски на точность изготовления и совмещения стыкуемых поверхностей в горизонтальной и вертикальной плоскостях, нагрузки, вызванные внецентренным приложением усилий (перекосами), и другие значимые факторы.

Верхние значения вертикальных и боковых нагрузок на элементы СУ определяются не только технологическими допусками на точность изготовления конструкций ВС и ОО, допусками на деформации конструкций, наблюдаемые при погрузочно-транспортных операциях, но и конструкционной прочностью опорных оснований и верхних строений.

#### Основные выводы

Выполненный анализ конструкций СУ для монтажа верхних строений на опорные основания морских нефтегазодобывающих платформ показал, что успешность и продолжительность высокотехнологичных морских операций по сборке платформ из моноблоков предопределяется используемыми конструктивными и технологическими решениями, заложенными при проектировании стыковочных устройств. Выбор этих решений зависит от типа морского сооружения, используемых при его создании материалов, сейсмостойкости и других факторов. Показаны конструктивные различия устройств, используемых на стационарных сооружениях и на ППБУ. Для последних особенно эффективно применение СУ, обеспечивающих принудительное совмещение стыкуемых поверхностей ВС и ОО за счёт упругого деформирования конструкций оснований. Предложены новые технические решения для СУ, используемых при морском монтаже сейсмостойких стационарных платформ с металлическими опорными колоннами и с железобетонными опорными блоками. Указаны конструктивные меры по совершенствованию стыковочно-опорных устройств для стационарных сооружений, эксплуатируемых в сейсмоопасных акваториях. Предложенные в работе конструкции СУ обеспечивают высокую надежность соединений ОО и ВС, низкие значения внутренних усилий в монтажных соединениях и невысокую материалоемкость сооружений в целом, высокую технологичность и малая стоимость морского монтажа. Описанные технические решения способны также повысить сейсмостойкость СП

**Литература**

1. Караев Р.Н. Морские сооружения для бурения и эксплуатации нефтегазовых скважин. СПб.: Издательство СПбГМТУ, 2014, 388 с.
2. Алферов В.И., Крыжевич Г.Б., Подгорный Л.Н., Попов Н.Г., Шапошников В.М. Опыт разработки проекта морской перевозки супермодулей ППБУ "Полярная звезда" и технологии их сборки в морских условиях. – Труды Крыловского государственного научного центра, 2011, вып. 65 (349).
3. Крыжевич Г.Б. Усилия в стыковых устройствах и напряжения в конструкциях, возникающие при монтаже плавучих буровых платформ наплавным способом. – Морские интеллектуальные технологии. 2016. № 4 (34), том 1.
4. Крыжевич Г.Б., Попов Н.Г. Монтаж плавучих буровых установок методом надвига на плаву с деформированием конструкций опорного основания. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2016. № 44/45.
5. Крыжевич Г.Б., Попов Н.Г. Разработка методов оценки усилий в обеспечении безопасного морского монтажа полупогружных и стационарных платформ. – Морской вестник. 2017; специальный выпуск №1(13), май 2017 г.
6. Правила разработки и проведения морских операций НД 2-090601-004. Санкт-Петербург, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 2014. 140 с.
7. Jong-Jin Jung, Woo-Seob Lee, Hyun-Soo Shin, Yun-Hak Kim. Evaluating the Impact Load on the Offshore Platform During Float-over Topside Installation. Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Osaka, Japan, June 21-26, 2009, pp. 205-210.
8. Jin-Ho Lee, Hyun-Soo Jung and Byung-Woo Kim Evaluation of Mating Dynamic Forces of Semi-submersible Offshore Structure Topside Module. – Journal of Ocean Engineering and Technology 27(1), 9-15, February, 2013, pp. 9-15.

**References**

1. Karaev R.N. Morskoye sooruzheniya dlja bureniya i ekspluatatsiyi neftegazovykh skvazhin. SPb: Izdatelstvo SPbGMTU, 2014, 388 s.
2. Alferov V.I., Kryzhevich G.B., Podgorny L.N., Popov N.G., Shaposhnikov V.M. Opyt razrabotki proecta morskoy perevozky supermoduley PPBU "Polarnaya zvezda" i tehnologii ich sborky v morskoykh uslovyakh. – Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra, 2011, vyp. 65 (349).
3. Kryzhevich G.B. Usilya v stykovykh ustroystvakh i napryazheniya v konstruktciyakh, voznykajushchye pri montaze plavutchykh burovyykh platform naplyvnyy sposobom. – Morskoye intellektualnye tehnologii. 2016. № 4 (34), tom 1.
4. Kryzhevich G.B., Popov N.G. Montag plavuchyykh burovyykh ustanovok metodom nadviga na plavu s deformirovaniem konstruktciy opornogo osnovaniya. Nauchno-technicheskyy sbornik Rossyiskogo morskogo registra sudocodstva. 2016. № 44/45.
5. Kryzhevich G.B., Popov N.G. Razrabotka metodov ocenki usilyi v obespechenye bezopasnogo morskogo montaga polupogrozhnyykh i stacionarnyykh platform. – Morskoy vestnic. 2017; specialnyi vypusk №1(13), may 2017.
6. Pravila razrabotki i provedeniya morskoykh operatsiy ND 2-090601-004. Sanct-Petersburg, FAU "Rossyiskiy morskoy registr sudochoodstva", 2014. 140 s.
7. Jong-Jin Jung, Woo-Seob Lee, Hyun-Soo Shin, Yun-Hak Kim. Evaluating the Impact Load on the Offshore Platform During Float-over Topside Installation. Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Osaka, Japan, June 21-26, 2009, pp. 205-210.
8. Jin-Ho Lee, Hyun-Soo Jung and Byung-Woo Kim Evaluation of Mating Dynamic Forces of Semi-submersible Offshore Structure Topside Module. – Journal of Ocean Engineering and Technology 27(1), 9-15, February, 2013, pp. 9-15.



УДК 629.12.001.2

## КОНЦЕПЦИЯ РИСКА В ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ МОРСКОГО НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

**Алексей Семёнович Портной**

доцент, кандидат технических наук,  
профессор Кафедры океанотехники и морских технологий  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: port\_ocean@mail.ru

**Екатерина Сергеевна Зуева**

аспирант Кафедры океанотехники и морских технологий  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: zueva\_ekaterina\_smtu@mail.ru

### Аннотация

В статье приводятся основы концепции безопасности морских сооружений, показаны причины возникновения аварий, приведено различие понятий «авария» и «аварийная ситуация», рассмотрены особенности развития инцидентов на объектах МНГК. Приведены выдержки из нормативных документов РМРС и Федеральных законов по проблемам безопасности, выполнен их сравнительный анализ, показана роль принятой концепции безопасности при реализации решения. Показана связь безопасности объектов МНГК с техническими системами и приводятся аксиомы теории безопасности, которые реализуются в концепции безопасности морской техники. Выполнена классификация аварийных ситуаций для различных объектов МНГК, рассмотрены особенности возникновения причин аварий и инцидентов. Показано место системы безопасности в процессе проектирования объекта морской техники. Проанализированы механизмы возникновения и распространения аварий на морском промысле.

**Ключевые слова** Безопасность, морской нефтегазовый комплекс, опасность, окружающая среда, опасный фактор, инцидент, авария, последствия, причины аварии.

## RISK CONCEPT IN ENSURING SAFETY OF MARINE OIL AND GAS COMPLEX

**Alexey S. Portnoy**

PhD in Engineering Science, Associate Professor,  
Professor, Department of Ocean Engineering and Marine Technology  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: port\_ocean@mail.ru

**Ekaterina S. Zueva**

Postgraduate Student, Department of Ocean Engineering and Marine Technology  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: zueva\_ekaterina\_smtu@mail.ru

### Abstract

The article presents the basics of the concept of safety of offshore structures, shows the causes of accidents, gives the difference between the concepts of "accident" and "emergency", and discusses the features of incidents development at MOGC facilities. The excerpts from regulatory documents of the RMRS and Federal laws on safety issues are given, their comparative analysis is performed, and the role of the adopted safety concept in the implementation of the decision is shown. The connection between the safety of MOGC facilities and technical systems is shown, and the axioms of safety theory, which are implemented in the concept of safety of marine equipment, are given. The classification of emergencies for various facilities of the MOGC was carried out, the features of the causes of accidents and incidents were reviewed. The place of the security system in the process of designing a marine equipment facility is shown. The mechanisms of the occurrence and propagation of accidents in the marine industry are analyzed.

**Keywords** Safety, marine oil and gas complex, hazard, environment, hazardous factor, incident, accident, consequences, accident causes.

### Введение

МНГК — часть техносферы, которая в свою очередь является частью биосферы, преобразованной человеком в технические и

техногенные объекты (буровые и добычные морские платформы, причальные сооружения, подводные скважины, обслуживающие суда, подводные трубопроводы и т. д.) в целях соответствия внешних

условий потребностям человека. Преобразование осуществляется прямым или косвенным воздействием технических средств, которые по классификации В.С. Малкина включают в себя технику, технические системы и используемую технологию.

Техника на морском промысле — это совокупность объектов, разработанных для обеспечения процессов бурения, добычи, транспортировки сырья и обслуживания потребностей функционирования МНГК.

Техническая система в составе МНГК — это совокупность отдельных составных частей комплекса, связанных между собой функционально и взаимодействующих между собой, чтобы обеспечить выполнение заданных функций при различных состояниях. Одним из признаков МНГК как системы является структурированность, то есть взаимосвязанность составляющих ее частей и подчиненность ее организации общей цели. Элементом МНГК может считаться некоторый объект (материальный, энергетический, информационный), обладающий рядом важных для нас свойств, но внутреннее строение которого безотносительно к цели рассмотрения, т.е. не подлежит дальнейшему разделению на части в рамках данного исследования. Связью является обмен между элементами веществом, энергией, информацией.

С позиций безопасности задачи исследования технических систем МНГК заключаются в выявлении процесса функционирования элементов МНГК при взаимодействии ее с другими ее частями комплекса и причины возникновения неисправности или отказа, приводящего к негативным последствиям для окружающей среды.

При проектировании объекта МНГК или технологии морской нефтегазодобычи проектант обладает лишь набором требований заказчика в виде технического задания. Обычно известны в общем виде цели, для выполнения которых создается объект, и район(-ы) его эксплуатации. То есть необходимо создать объект, который бы обеспечивал максимально рентабельное и безопасное выполнение требуемых функций в заданных районах эксплуатации.

Термин «безопасность» означает состояние, при котором любая опасность отсутствует. Не смотря на наличие «концепции абсолютной безопасности», абсолютная безопасность в реальности невозможна, поэтому целью проектанта является минимизация опасности на всех стадиях жизненного цикла объекта морской нефтегазодобычи. Такая минимизация ограничена нормативными требованиями и рентабельностью.

Таким образом, первым этапом обеспечения безопасности при проектировании можно принять выявление опасностей, которые могут привести к возникновению аварийной ситуации. Эти опасности обусловлены климатическими и метеорологическими характеристиками района эксплуатации, судоходной и рыбопромысловой деятельностью в этом районе, свойствами пласта и пластовой продукции и многими другими параметрами. Выявленная совокупность опасных факторов представляет собой набор начальных условий для решения вопроса обеспечения безопасности.

Следующим этапом является поиск вариантов снижения негативного воздействия опасных факторов до допустимого уровня, соответствующего требованиям нормативной документации в области морской нефтегазодобычи.

На последующих этапах, после проведения оптимизации, получаем вариант, соответствующий требованиям безопасности.

### 1. Классификация опасностей на МНГК

Понятие «опасности» имеет различное толкование в нормативных документах. В большинстве из них под опасностью понимается источник потенциального вреда или ситуация с потенциальной возможностью нанесения вреда. Опасность — следствие действия негативных (вредных и опасных) факторов на объект МНГК. При несоответствии характеристик воздействующих факторов характеристикам объекта воздействия и появляется опасность.

По Правилами РМРС под опасностью понимается явление (природное или техносферные), при котором возможно возникновение явлений или процессов, способных поражать людей, наносить материальный ущерб, разрушительно действовать на окружающую человека среду. Исходя из этого определения, опасные факторы по природе происхождения можно разделить на природные и техногенные.

Как свойство, опасность, внутренне присуща практически любой сложной технической системе МНГК. Она может реализоваться в виде прямого или косвенного ущерба для объекта, воздействуя постепенно или внезапно в результате отказа частей системы. Потенциальная опасность реализуется в различных формах: для персонала на МНГК — в форме травм при несчастных случаях, авариях, пожарах и пр., для технических систем — в форме разрушений, потери управляемости и т. д., для экологических систем — в виде загрязнений и др.

Опасности присущи ряд определяющих признаков — это возможность непосредственного отрицательного воздействия на объект МНГК и возможность нарушения нормального состояния производственного процесса, которые могут привести к авариям, взрывам, пожарам, травмам.

Техногенные явления при функционировании МНГК — события, являющиеся следствием эксплуатации технических устройств, механизмов, оборудования и т. п.

На основе работ В.А. Акимова, В.В. Лесных, В.С. Малкина, Э.А. Арустамова при проведении анализа реальных аварийных ситуаций и событий можно сформулировать ряд аксиом об опасности технических систем, к которым относится и МНГК:

1. МНГК, как техническая система, потенциально опасен. Потенциальность опасности заключается в неявном характере и проявляется при определенных условиях. МНГК при его функционировании не позволяет достичь абсолютной безопасности.

2. Техногенные опасности существуют, если потоки вещества, энергии и информации в техносфере превышают предельные значения, которые устанавливаются из условия сохранения функциональной и структурной целостности человека и природной среды, окружающей МНГК.

3. Источниками техногенных опасностей являются элементы техносферы. Опасности возникают при наличии неисправностей в технических системах при их неправильном использовании. Технические неисправности и нарушения режимов использования технических систем в составе МНГК приводят, как правило, к возникновению травмоопасных ситуаций, а выделение отходов (выбросы, стоки, поступление веществ на морское дно и береговую зону, энергетические излучения и поля) сопровождается формированием вредного воздействия на окружающую среду.

4. Техногенные опасности действуют в пространстве и во времени. При этом травмоопасные воздействия действуют, как правило, кратковременно и спонтанно. Они возникают при авариях и катастрофах на объекта МНГК.

Для вредных воздействий характерно длительное или периодическое негативное влияние на человека, природную среду и элементы техносферы. Пространственные зоны вредных воздействий изменяются в широких пределах, от рабочих и бытовых зон морской платформы до размеров, превышающих площадь акватории МНГК. Особое место при функционировании МНГК занимают воздействия выбросов парниковых и озоноразрушающих газов и т. п.

5. Техногенные опасности МНГК оказывают негативное воздействие на человека, природную среду и элементы техносферы одновременно. Они не действуют избирательно, а негативно воздействуют на все составляющие одновременно.

6. Техногенные опасности ухудшают здоровье людей, приводят к травмам, материальным потерям и к деградации природной среды.

Применение этих аксиом для МНГК позволяет правильно идентифицировать опасности, т.е. признать, что опасности существуют объективно и определить их характерные черты.

Рост опасностей при функционировании МНГК, т. е. числа и масштабов последствий техногенных аварий и катастроф на морском месторождении, обусловлено сложностью производства с применением новых технологий, требующих увеличения энергии, повышения содержания опасных для жизни человека веществ и оказывающих заметное воздействие на окружающую МНГК среду.

Для того, чтобы определить основные виды опасностей на морском месторождении необходимо уточнить понятие «опасность» на МНГК.

Опасность на МНГК является сложным, иерархическим понятием, имеющим множество признаков.

В общем виде опасности могут быть классифицированы различным образом. Одна из классификаций показана в табл. 1

Классификация опасностей на МНГК может быть проведена и по другим признакам, например по энергетическому воздействию:

1. Механические — характеризуются кинетической энергией движущихся и вращающихся элементов и потенциальной энергией и механическим влиянием на объекты воздействия;

2. Термические — характеризуются тепловой энергией и аномальной температурой. К ним

относятся: температура нагретых или охлажденных поверхностей, открытого огня, пожара, химических реакций и др. источников

3. Электрические и электромагнитные — электрический ток, статическое электричество, ионизирующие излучения, электрическое поле, электромагнитные излучения, магнитное поле и др.;

4. Химические — едкие, ядовитые, огне- и взрывоопасные вещества, а также нарушение естественного газового состава воздуха, наличие вредных примесей в воздухе.

Таблица 1

Классификация опасностей на МНГК

Принцип классификации	Группы опасностей
по природе происхождения	природные, техногенные, антропогенные, экологические, смешанные
производственные	физические, химические, биологические, психофизиологические, организационные
по времени проявления отрицательных последствий	импульсивные (в виде кратковременного воздействия, например удар) и кумулятивные (накопление и суммирование действия)
по месту локализации в окружающей среде	связанные с атмосферой, гидросферой, литосферой
по приносимому ущербу	социальные, технические, экономические, экологические и т. д.
по характеру воздействия	активные (оказывают непосредственное воздействие путем заключенных в них энергетических ресурсов); пассивно-активные (активизирующиеся за счет энергии, носителем которой является сам объект); пассивные — проявляются опосредованно (коррозия материалов, накипь, недостаточная прочность конструкций, повышенная нагрузка на оборудование, приводящая к разрушениям, взрывов и т. п.)
добровольные и принудительные опасности	воздействию опасностей можно подвергаться как добровольно, например, работая на промышленном предприятии, так и принудительно, находясь вблизи места событий в момент реализации опасностей, т.е. можно выделять опасности производственные и непроизводственные (риск для третьих лиц)
по структуре (строению)	простые (электрический ток, повышенная температура) и производные — порожденные

	взаимодействием простых (пожар, взрыв и т. п.)
по сосредоточены ю	сконцентрированные (например, выброс и фонтан нефти на МБУ) и рассеянные (например, загрязнение, вызванное этим инцидентом)

Значительная часть опасностей не всегда приводит к возникновению инцидента, но усложняет выполнение работ при регламентированной технологии.

## 2. Установление содержания термина «авария»

В российской нормативной базе не существует единого подхода к определению термина «авария».

Согласно Правилам РМРС авария – нештатное событие (происшествие), возникновение которого не ожидается во время обычного функционирования платформы, и которое может вызвать существенные повреждения конструкции, если оно не учтено при проектировании, а аварийная ситуация – эксплуатационная ситуация, во время которой может реализоваться авария.

По Федеральному Закону о промышленной безопасности и иным нормативно-правовым актам РФ, а также правилам ведения работ на опасном производственном объекте, инцидент - отказ или повреждение технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, отклонение от режима технологического процесса.

Анализ этих определений выявил, что:

— в Правилах Регистра «Классификация ПБУ» пожар и взрыв отнесены к аварийным ситуациям, хотя в соответствии с определениями этого документа, они могут считаться авариями;

— в Правилах Регистра по нефтегазовому оборудованию взрыв отнесен к аварийным ситуациям, хотя в самом документе приведено определение, однозначно трактующее взрыв как аварию; термин «аварийная ситуация» не расшифрован, хотя активно используется, в том числе применительно как к взрыву, так и к пожару, опрокидыванию, фонтанированию и др.

Для обеспечения однозначности терминологии под аварией будем понимать результат реализации опасности, а для аварийной ситуации будем использовать понятие, что это эксплуатационная ситуация, во время которой может реализоваться авария.

## 3. Анализ причин отказов на МНГК

Объекты МНГК следует рассматривать как источники повышенной опасности для людей и окружающей среды. Это неизбежный результат НТП. Наблюдаются неуклонное повышение добычи и транспортировки, энерговооруженности в промышленности, создаются уникальные по размерам и мощности комплексы для производства электрической энергии, для добычи и транспортирования нефти и газа на море. Все это приводит к постановке проблемы обеспечения безопасности.

Значительное место в проблеме безопасности занимает безопасность при нормальной эксплуатации. Когда возникновение опасности вызвано нарушениями работоспособности объекта

необходимо обеспечить его безотказность. Такие отказы должны быть исключены посредством технических и организационных мер, либо вероятность их возникновения в течение нормативного срока службы должна быть снижена до минимума.

Отказы, приводящие к тяжелым последствиям, относят к категории «критических». К авариям принято относить все отказы, наступление которых связано с угрозой для людей, окружающей среды, а также приводящие к серьезным экономическим и моральным потерям.

Аварии могут быть связаны как с исключительными воздействиями (ударными нагрузками, ураганами, пожарами, штормами), так и с неблагоприятным сочетанием обычных нагрузок с весьма малой вероятностью появления (падение груза при швартовке судна обеспечения буровых установок и пр.). Исходной причиной аварии могут служить ошибки, допущенные при проектировании, расчете, изготовлении, монта-же, эксплуатации и техническом обслуживании, а также сочетания этих ошибок с неблагоприятными внешними условиями, не зависящими от технического персонала.

Изучение Ветошкиным А.Г. обстоятельств аварийности и травматизма в отраслях показало, что наибольший вклад приносят такие источники опасности, как электросиловое оборудование, средства хранения сжатых газов, токсичных и легковоспламеняющихся жидкостей, подвижное технологическое оборудование.

Наиболее типичной причиной происшествия на МНГК могут быть следующие предпосылки: ошибка человека или отказ технологического оборудования, или недопустимое внешнее воздействие, случайное появление опасного фактора в производственной зоне; неисправность (или отсутствие) предусмотренных на этот случай средств защиты или неточные действия людей в данных условиях; воздействие опасных факторов на незащищенные элементы оборудования, человека или окружающую их среду.

По данным Ветошкина А.Г. доля исходных предпосылок, вызванных ошибочными и несанкционированными действиями человека, составляет 50-80 %, тогда как технические предпосылки – 15-25 %.

Опасность появляется в результате неконтролируемого выхода энергии, накопленной в оборудовании и материалах, непосредственно в человеке и окружающей среде.

Инициаторами и составными звеньями происшествия являются ошибочные и несанкционированные действия людей, неисправности и отказы используемой техники, а также нерасчетные (неожиданные и превышающие допустимые пределы) внешние факторы среды обитания.

Объектом исследования безопасности МНГК являются системы «человек - машина – среда обитания», а предметом изучения безопасности – объективные закономерности возникновения и предупреждения происшествий при функционировании МНГК.

Рассмотрим примеры классификации опасностей, приводящих к отказам технических систем на МНГК.

МНГК эксплуатируется в определенных условиях окружающей среды; объекты МНГК испытывают весь комплекс воздействий факторов окружающей среды (климатических, динамических, биологических и др., например, воздействие ветра, волн, льда и т.д.), факторов нагрузки (режим работы и взаимодействие элементов, например, удары и навалы при швартовке танкеров и судов обеспечения и прочее), а также искусственных факторов (преднамеренное воздействие извне). Эти факторы могут привести к изменению параметров и состояния работоспособности отдельных элементов, узлов системы и могут быть классифицированы следующим образом (см. табл. 2 и табл. 3)

Таблица 2

**Опасные природные явления (по ГОСТ Р 22.0.03-97) с учетом эксплуатации МНГК в морских условиях**

Опасные геологические процессы	Опасные гидрологические явления и процессы	Опасные метеорологические явления
Землетрясение, подвижка грунта, вулканическое извержение, карст (карстово-суффозионный процесс), просадка в грунтовых грунтах	Размыв грунта, русловая эрозия, цунами, штормовой нагон воды, затор, зажор	Сильный ветер (шторм, шквал, ураган), смерч, вихрь, сильные осадки (ливень, сильный снегопад или метель, гололед, град), туман, низкие температуры, обледенение, удар молнии

Исходя из опыта проектирования морских нефтегазовых сооружений (МНГС) для северных акваторий, в перечень опасных природных факторов следует включить плавучие льды, торосы, айсберги как специфическую угрозу северных акваторий шельфа России.

В отношении внешних угроз при морской нефтегазодобыче таких как, опасности техногенного происхождения, нет подобного устоявшегося подхода ввиду их многообразия и постоянного изменения. Однако всех их можно разделить на три основные категории по области возможного воздействия на объект проектирования: воздушные; плавучие; подводные.

**4. Анализ процесса развития опасности на МНГК**

Рассмотрим типы аварий на МНГК и их развитие. Процесс развития опасности на МНГК можно описать следующей логической последовательностью:

1. Нарушение технологического процесса, допустимых пределов эксплуатации, условий и т. п.
2. Накопление, образование поражающих факторов, приводящих к аварии технические системы.
3. Разрушение конструкции, отказ оборудования и прочее.
4. Выброс, пожар, взрыв, образование поражающих факторов.

5. Воздействие (взаимодействие) поражающих факторов с объектом воздействия (с окружающей природной средой, человеком, объектами техносферы и пр.

6. Реакция на поражающее воздействие.

В зависимости от особенностей технической системы отдельные элементы приведенной цепи могут отсутствовать. Каждому такому событию можно приписать частный показатель в виде вероятности события:

- ◆ вероятность отказа технической системы;
- ◆ вероятность аварийного исхода;
- ◆ вероятность образования поражающих факторов;
- ◆ вероятность поражения объектов воздействия;
- ◆ вероятность вторичных поражающих факторов;
- ◆ вероятность воздействия;
- ◆ вероятность поражения.

Наличие потенциальной опасности в системе не всегда сопровождается ее негативным воздействием на объект. Любое исключение в цепи ведет к тому, что опасность не реализуется. В общем случае для реализации опасности необходимо выполнение минимум трех условий: опасность реально действует; объект находится в зоне действия опасности; объект не имеет достаточных средств защиты.

Анализируя статистические данные MMS (Minerals Management Service, USA) по аварийности МНГС Мексиканского залива можно отметить закономерность, что более 70 % всех аварий на МНГС Мексиканского залива совокупно происходили по двум причинам: отказы оборудования и ошибки персонала.

Таким образом, опасные факторы, рассмотрение которых необходимо на начальной стадии проектирования объекта МНГК могут быть следующие (см. рис. 1).

Таблица 3

**Факторы, приводящие к появлению отказов технических систем МНГК**

Последствия и факторы, приводящие к ним
<b>Перегрузка в результате недооценки действующей нагрузки</b>
снег и наледь на конструкциях объекта несоответствие фактических масс конструкций проекта; ветер, волны, лед, течения, сейсмические воздействия; динамические воздействия нагрузки; температурные воздействия.
<b>Общая и местная потеря устойчивости элементов конструкции</b>
ошибки в расчетах, чертежах, нарушении технологии работ; низкая экспериментальная отработка проектных решений; возникновение эксцентриситета при приложении нагрузки; податливость монтажных стыков несвоевременное или неправильное закрепление опор; температурные деформации;



недостаточная толщина листовых конструкций; искажение геометрических форм конструкций; наличие бухтин, вмятин и других местных искривлений.
<b>Ошибочные проектные решения и отступления от проекта</b>
неудачный выбор расчетной схемы; низкая точность расчета; недоработка узлов сопряжений; занижение расчетной нагрузки по сравнению с реальной; недооценка жесткости, прочности, устойчивости конструкций; замена одного материала другим; низкая квалификация исполнителей; отсутствие авторского и технического надзора; наличие концентраторов напряжений.
<b>Некачественное изготовление и монтаж конструкций</b>
применение некачественных материалов; низкое качество изготовления конструкций; неправильный выбор способа и порядка монтажа; нарушение технологии сварки; ввод в действие сооружений с существенными недостатками.
<b>Нарушение правил эксплуатации конструкций и сооружений</b>
отсутствие защиты конструкций, работающих в агрессивных средах, при колебаниях температуры и влажности;

взрывы, пожары, затопления; вибрации, удары, истирание; отсутствие надлежащего инструментального контроля; перегрузка; форсирование нагрузки без усиления конструкций и регулирования напряжений в них.
<b>Усталость, вибрация, коррозия и старение материала</b>
усталостные разрушения; разрушения от процессов старения; вибродинамическое действие; загрязнение окружающей среды; наличие поверхностных дефектов в конструкциях; резкие колебания температуры; осадки.
<b>Непредвиденные (непрогнозируемые) причины</b>
аварии от провалов, подвижек донного грунта, обрушений вышележащих конструкций; сейсмические воздействия и извержения вулканов; грозовые разряды, град, падение метеоритов; аварии от биологических вредителей; ураганы, тайфуны, цунами, ледоходы; пожары; разрыв фундаментов донными течениями и волнами



Рис. 1. Опасные факторы для объекта МНГК

**Заключение**

Проблема поиска мер обеспечения безопасности объектов МНГК основывается на следующих положениях.

1. Первичным негативным последствием воздействия опасного фактора на технический объект является аварийная ситуация, которая может привести к аварии.

2. В ходе реализации аварии возникают негативные последствия, которые оцениваются по выбранным критериям на допустимость.

3. Если последствия воздействия неприемлемы, то необходимо принять меры по приведению их в требуемые пределы.

Соответственно, для МНГК технические и организационные меры по обеспечению безопасности объекта проектирования принимаются в рамках трех основных направлений:

1. Предупреждение возникновения аварий на объекте;

2. Локализация, недопущение распространения аварий;

3. Ограничение негативных последствий аварий.

Задачей проектанта является создание необходимого и достаточного комплекса мер по этим трем направлениям с учетом опасностей, которые угрожают будущему объекту морской нефтегазодобычи, поиска, хранения и транспортировки.

Рациональным при определении мер будет использование подхода «от простого к сложному», т.е. рассмотрение каждой аварии по отдельности. Далее полученные варианты мер обеспечения безопасности по каждой аварии собираются в единый комплекс обеспечения безопасности. При этом необходимо проанализировать их взаимовлияние, а также рассмотреть альтернативные варианты, поскольку каждая отдельная задача может быть решена не одним, а несколькими способами.

### Литература

1. Алешин И.В., Портной А.С. Экологический риск при освоении ресурсов Мирового океана (монография) СПб: Изд СПбГМТУ, 2011. - 176 с.
2. Портной А.С. Теория риска при проектировании морской техники (монография) СПб: Изд. СПбГМТУ, 2008. - 204 с.
3. Алешин И.В. и др., Безопасность на морских нефтегазопромыслах (учебник), СПб: Изд СПбГМТУ, 2014. - 323 с.
4. Алешин И.В. и др. Безопасность морских технологий: Обеспечение экологической безопасности морских технологий // Морские интеллектуальные технологии. – 2017, №2(36). - с. 11–16.
5. Малкин В.С. Надежность технических систем и техногенный риск. Ростов на Дону: Изд. ФЕНИКС, 2010, 432 с.
6. Ветошкин А.Г., Таранцева К.Р. Техногенный риск и безопасность. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2001, 170 с.
7. Ветошкин А.Г., Марунин В.И. Надежность и безопасность технических систем. /Под ред. доктора технических наук, профессора, академика МАНЭБ А.Г.Ветошкина. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун та, 2002, 129 с.

### References

1. Aleshin I.V., Portnoj A.S., «Jekologicheskij risk pri osvoenii resursov Mirovogo okeana», Monografija, Izd. SPbGMTU, 2011, 176 p.
2. Portnoj A.S. Teoriya riska pri proyektirovanii morskoy tekhniki [Theory of risk in the design of marine equipment] SPb: Izd. SPbGMTU, 2008, 204 p.
3. Aleshin I.V., Goncharov V.K., Ljubimov E.V., Portnoj A.S., V.N. Razuvaev, «Bezopasnost' na morskikh neftegazopromyslah» [Safety in marine oil and gas fields] SPb, SPbGMTU, 323 p.
4. Aleshin I.V. et al. Bezopasnost' morskikh tekhnologiy: Obespecheniye ekologicheskoy bezopasnosti morskikh tekhnologiy. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii. – 2017, №2(36), pp. 11–16.
5. Malkin V. S. Nadezhnost' tehniceskikh sistem i tehnogennyj risk [Reliability of technical systems and technological risk]. Rostov na Donu, Feniks, 2010, 432 p.
6. Vetoshkin A.G., Taranceva K.R. Tehnogennyj risk i bezopasnost' [Technological risk and safety]. Penza, Izdatelstvo PSU, 2001, 170 p.
7. Vetoshkin A.G., Marunin V.I. Nadezhnost' i bezopasnost' tehniceskikh system [Reliability and safety of technical systems]. Penza, Izdatelstvo PSU, 2002, 129 p.

**ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА**

УДК 629.563.21.002.72.39.4

**АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ  
САМОПОДЪЕМНЫХ ПЛАВУЧИХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК С УЧЕТОМ  
УПРУГИХ СВОЙСТВ ГРУНТА****Геннадий Брониславович Крыжевич**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры строительной механики корабля  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: G\_Kryzhevich@ksrc.ru

**Трифон Родионович Рыбалко**

магистрант кафедры строительной механики корабля  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: Tridarry@yandex.ru

**Аннотация**

В статье выполнен анализ влияния упругих свойств грунта на собственные частоты и формы колебаний СПБУ на основе систематических расчетов, выполненных с помощью программного комплекса ANSYS Mechanical APDL. Разработана динамическая конечно-элементная модель СПБУ «Арктическая». Изучены основные особенности низших собственных форм колебаний СПБУ с тремя колоннами. Дана оценка изменчивости в процессе эксплуатации собственных частот и форм упругих колебаний СПБУ вследствие использования платформы на акваториях с различной глубиной и различными упругими свойствами грунта. Выполнены расчеты собственных частот и форм колебаний СПБУ для выявления особенностей деформирования СПБУ при реализации низших собственных форм колебаний и закономерностей группирования частот. Установлено, что с ростом уровня податливости грунта собственные частоты СПБУ убывают. Делается вывод о существенной роли трех низших форм колебаний в расчетах прочности и усталости конструкций СПБУ, связанной с резонансными колебаниями установок при воздействии на них морского волнения.

**Ключевые слова:** самоподъемные плавучие буровые платформы, динамика морских платформ, собственные частоты и формы колебаний платформ, метод конечных элементов.

**ANALYSIS OF NATURAL FREQUENCIES AND MODE SHAPES OF SELF-ELEVATING FLOATING DRILLING RIGS WITH ACCOUNT OF ELASTIC PROPERTIES OF SOIL****Gennady B. Kryzhevich**

Dr.Sci.Tech, professor

Professor of the Department of Structural Mechanics of the Ship  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: G\_Kryzhevich@ksrc.ru

**Trifon R. Rybalko**

Master's Degree Student of the Department of Structural Mechanics of the Ship  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: Tridarry@yandex.ru

**Abstract**

The article analyzes the influence of the elastic properties of the soil on the natural frequencies and mode shapes of self-elevating floating drilling rig (SEFDR) based on systematic calculations performed using the ANSYS Mechanical APDL software package. The dynamic finite element model of the SEFDR "Arcticheskaya" has been developed. The main features of the lowest natural mode shapes of SEFDR with three columns are studied. An assessment of the variability of the natural frequencies and elastic mode shapes of a SEFDR, in the process of operation, due to the use of a platform in water areas with different depths and different elastic properties of the soil, has been given. Calculations of natural frequencies and mode shapes of a SEFDR were carried out to identify the features of deformation of a SEFDR during the implementation of lower natural mode shapes and frequency grouping patterns. It has been determined that with an increase in the soil flexibility level, the natural frequencies of a SEFDR decrease. The conclusion is made upon the significant role of the three lowest mode shapes in the

calculations of the strength and fatigue of the structures of SEFDR associated with the synchronic vibrations of drilling rigs when exposed to sea waves.

**Keywords:** self-elevating floating drilling rigs, dynamics of offshore platforms, natural frequencies and mode shapes of platforms, finite element method.

### Введение

К числу морских нефтегазодобывающих платформ, активно используемых на шельфе морей России, относятся самоподъемные плавучие буровые установки (СПБУ) [1, 2, 4]. Несмотря на значительный опыт создания и эксплуатации СПБУ до сих пор не изучены особенности их основных динамических характеристик, играющих важную роль при рациональном проектировании таких платформ. К этим характеристикам относятся, в частности, собственные формы и частоты колебаний СПБУ, закрепленных на грунте.

Вопрос о собственных частотах и формах колебаний СПБУ возникает при оценке предельной и усталостной прочности их конструкций в условиях воздействия волнения и ветра, а также при сейсмических возмущениях. От формы колебаний сильно зависят приведенные (обобщенные) внешние силы, вызывающие упругие колебания СПБУ.

Совпадение собственных частот колебаний с частотами, соответствующими максимальным значениям спектральных плотностей внешних воздействий (морского волнения или сейсмического процесса) приводит к появлению интенсивных резонансных колебаний СПБУ. В конечном итоге некоторые формы колебаний могут решающим образом влиять на предельную прочность и скорость процесса накопления усталостных повреждений конструкций, а другие собственные формы и частоты колебаний могут быть практически интересны только с точки зрения предотвращения резонансов при работе энергетических установок и бурового оборудования [3, 5].

Частоты и формы колебаний зависят от большого числа конструктивных факторов (изгибной жесткости колонн, их числа, инерционных характеристик корпуса, глубины акватории в месте бурения и зависящей от нее высоты расположения корпуса по отношению к морскому дну, размеров опорных башмаков и т.д.) и от упругих свойств грунта. Среди отмеченных факторов имеются претерпевающие большие изменения в процессе эксплуатации СПБУ. К ним в первую очередь следует отнести высоту расположения корпуса над уровнем дна и упругие свойства грунта, которые в принципе могут сильно отличаться не только в различных районах морской акватории, но и в местах расположения отдельных опорных башмаков конкретной установки.

В связи с отмеченными обстоятельствами к целям настоящей работы относятся:

- изучение основных особенностей низших собственных форм колебаний СПБУ с тремя колоннами, получивших наибольшее распространение в отечественной практике создания самоподъемных платформ;
- изучение основных закономерностей группирования низших частот таких СПБУ на примере платформы «Арктическая»;
- оценка изменчивости в процессе эксплуатации собственных частот и форм упругих колебаний СПБУ

вследствие использования платформы на акваториях с различной глубиной и с различными упругими свойствами грунта.

Для достижения этих целей решены следующие задачи:

- составлена конечно-элементная модель СПБУ «Арктическая»;
- выполнено моделирование упругих свойств грунта в широких пределах;
- выполнены систематические расчёты собственных частот и форм колебаний СПБУ для выявления особенностей деформирования СПБУ при реализации низших собственных форм колебаний и закономерностей группирования собственных частот, а также для оценки влияния глубины акватории и свойств грунта в местах расположения башмаков на низшие собственные частоты и формы колебаний.

### 1. Описание математической модели

На рис. 1 приведены объекты исследования – СПБУ «Арктическая» и принятая в расчете идеализация конструкции. Основные габаритные характеристики СПБУ: состоит из трех опорных колонн и корпуса понтона: длина корпуса с вертолетной палубой (без вертолетной палубы) – 100,9 м (88,0 м); ширина корпуса – 66,0 м; длина опорных колонн – 139 м; вес СПБУ – 16000 т; погонная масса колонн – 7,73 м.

Конечно-элементная модель опорных колонн учитывает их оформление в виде ферменных конструкций, состоящих из горизонтальных и вертикальных цилиндрических труб, моделируемых стержневыми элементами. Корпус понтона смоделирован твердым телом с массой и моментами инерции (КЭ MASS21). Взаимодействие колонны с грунтом моделировалось упругими элементами (пружинами) с податливостями  $A_i$ , соответствующими свойствам грунта. Для описания упругих свойств основания колонн использовались конечные элементы COMBIN14. Жесткости элементов являются обратными величинами по отношению к  $A_i$ :

$$k_i = 1 / A_i \quad (1)$$

Согласно правилам PMPC [3] коэффициенты податливости  $A_i$  определяются по формулам:

- при вертикальных колебаниях

$$A_v = (1 - \mu) / (4Gr_0) \quad (2)$$

- при горизонтальных колебаниях

$$A_h = (2 - \mu) / (8Gr_0) \quad (3)$$

- при вращении вокруг вертикальной оси

$$A_r = 3(1 - \mu) / (8Gr_0^3) \quad (4)$$

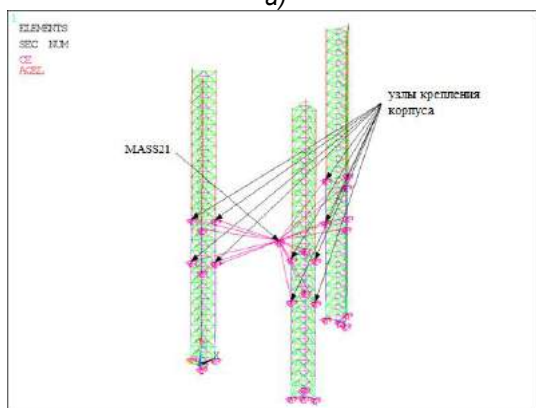
- при вращении вокруг горизонтальной оси, лежащей на поверхности морского дна

$$A_t = 3 / (16Gr_0^3) \quad (5)$$

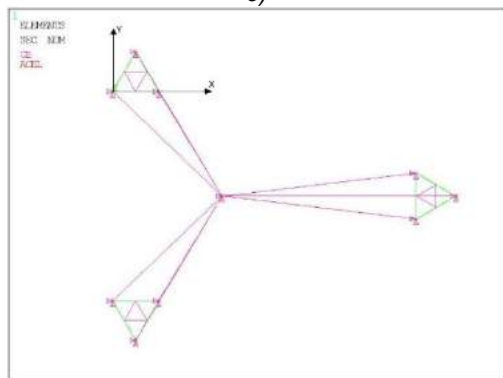
где  $G$  – модуль сдвига грунта, МПа;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $r_0$  – радиус основания колонны, м.



а)



б)



в)

Рис. 1. Объекты исследования: а) СПБУ «Арктическая», б) идеализированная конструкция СПБУ; в) модель СПБУ (вид сверху).

Характеристики жесткости грунта представлены в табл. 1.

При выполнении систематических расчётов собственных частот и форм колебаний выполнялось варьирование свойств грунта, отражающееся на податливости закрепления опорных (нижних) точек колонн, на трёх уровнях. Средний уровень податливости (СУП) соответствует податливости грунта, характерного, например, для шельфа Балтийского моря в районе Калининграда. Кроме

того, рассмотрен уровень высокой податливости (ВУП), который соответствует предельно допустимым (по условиям опрокидывания) параметрам грунта и размерам задавливаемого в него башмака, а также предельно низкий уровень податливости (НУП), соответствующий большим размерам башмака и высоким жестким характеристикам грунта. Этому уровню условно соответствует предположение о несмещаемости в вертикальном и горизонтальном направлениях опор колонны и ее жесткая заделка в грунте.

Всего в каждом варианте расчетной модели используется 25780 КЭ.

Собственные частоты и формы колебаний определялись при глубинах акватории 30 м и 70 м.

Применяя формулу из комбинаторики, можно высчитать количество вариантов расчёта:

$$N = a^k, \tag{6}$$

где а – число вариантов жесткости; k – число опорных колонн СПБУ.

Таким образом, для трёх опорных колонн и двух различных свойств грунта СУП и НУП, легко установить, что количество вариантов расчёта с различными вариантами жесткости грунта под отдельными колоннами будет восемь.

Однако, вследствие симметрии СПБУ относительно диаметральной плоскости корпуса количество вариантов расчёта можно сократить до 6 расчетных случаев: СУП-СУП-СУП, СУП-СУП-НУП, СУП-НУП-НУП, НУП-НУП-НУП, НУП-СУП-НУП и СУП-НУП-СУП.

Таблица 1

Характеристики грунта

№	Уровень податливости	Характеристик и грунта			Характеристики жесткости элемента, Н/м
		E, МПа	$\mu$	G, МПа	
1	ВУП	20	0,3	7,69	$k_v=3,077 \cdot 10^8$ $k_h=2,53 \cdot 10^8$ $k_r=1,01 \cdot 10^{10}$ $k_t=1,41 \cdot 10^{10}$
2	СУП	37	0,3	14,23	$k_v=5,69 \cdot 10^8$ $k_h=4,70 \cdot 10^8$ $k_r=1,86 \cdot 10^{10}$ $k_t=2,60 \cdot 10^{10}$
3	НУП	–	–	–	$k_v=k_h=k_r=k_t=\infty$

2. Результаты расчета

Для случаев эксплуатации СПБУ на глубинах акваторий, равной 30 и 70 метров, и при двух уровнях упругих свойств грунта (на первом уровне грунт для всех трех опор принят податливым, а на втором – жестким), были получены значения собственных частот колебаний, представленные в табл. 2. На рис. 2 показаны формы колебаний опорных колонн установки.



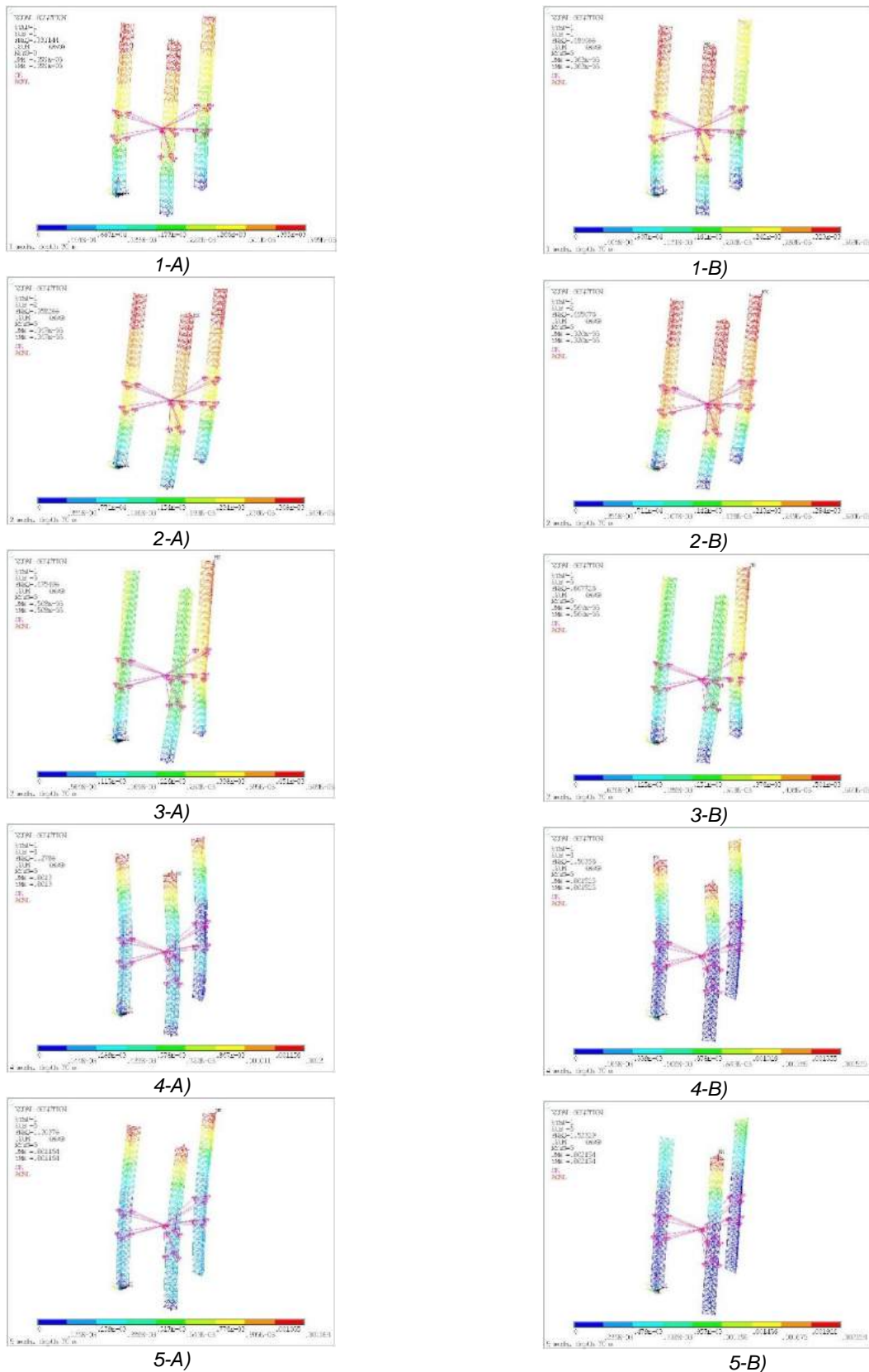


Рис. 2. Формы собственных колебаний СПБУ при глубине акватории 30 м. Цифрами обозначены номера форм, буквами – свойства грунта: А – СУП (3 опоры); В – НУП (3 опоры)

Собственным формам колебаний СПБУ соответствуют следующие особенности деформирования опорных колонн и перемещений корпуса:

– первая форма: изгиб колонн и перемещение корпуса происходит в плоскостях, параллельных YOZ;

- *вторая форма*: изгиб колонн и перемещение корпуса СПБУ происходит в плоскостях, параллельных  $XOZ$ ;
- *третья форма*: происходит вращение корпуса СПБУ вокруг вертикальной оси  $OZ$ , проходящей через ЦТ корпуса, наблюдается изгиб опорных колонн в трех разных плоскостях;
- *четвёртая форма*: корпус СПБУ остается неподвижным, происходит изгиб опорных колонн, расположенных выше корпуса СПБУ вдоль оси  $OY$ ;
- *пятая форма*: корпус СПБУ остается неподвижным, наблюдаются колебания опорных колонн, расположенных выше корпуса, друг к другу.

Таблица 2

**Значения собственных частот колебаний СПБУ при глубине эксплуатации 30 м и 70 м и одинаковых свойствах грунта под тремя опорами**

№	Собственные частоты, Гц					
	Глубина 30 м			Глубина 70 м		
	ВУ П	СУ П	НУ П	ВУ П	СУ П	НУ П
1	0,284	0,331	0,484	0,181	0,197	0,264
2	0,317	0,358	0,495	0,186	0,202	0,271
3	0,445	0,476	0,608	0,236	0,256	0,341
4	1,102	1,279	1,504	2,131	2,213	2,300
5	1,167	1,304	1,523	2,159	2,218	2,454
6	1,168	1,449	1,523	2,305	2,372	2,463
7	1,523	1,523	1,523	2,313	2,425	2,703
8	1,523	1,523	1,537	2,321	2,435	2,703
9	1,523	1,523	1,611	2,357	2,444	2,704
10	1,603	1,604	2,052	2,382	2,506	2,840

При глубине акватории 30 м и 70 м качественных отличий в поведении форм колебаний не наблюдается.

Из таблицы 2 видно, что:

- с ростом уровня податливости грунта собственные частоты убывают;
- с ростом глубины акватории (с увеличением расстояния от корпуса до дна) низшие собственные частоты (вплоть до частоты третьего тона) убывают, а высшие частоты возрастают;
- наблюдается группирование собственных частот (рис. 4–5). При различных глубинах акватории три первые низшие частоты образуют первую группу с относительно близкими значениями. Для глубины 30 м характерно следующее группирование собственных частот: при высокой податливости грунта близки значения, соответствующие номерам тонов от 4-ого до 9-ого; при среднем уровне податливости близки собственные частоты от 6-ой до 9-ой; при низком уровне близки собственные частоты от 4-ой до 8-ой. При глубине акватории 70 м характерно образование трех групп низших собственных частот. Имеется вторая группа, состоящая из четвертой, пятой и шестой частот, а также третья группа, объединяющая седьмую, восьмую и девятую собственные частоты. При дальнейшем возрастании номеров тонов колебаний группирование собственных частот носит сложный характер;
- при воздействии на установку морского волнения возможны ее резонансные колебания с заметной

реализацией первых трех форм собственных колебаний при любых уровнях податливости грунта и при любых глубинах акватории. Проявление резонансных процессов малой интенсивности с формами колебаний, соответствующей четвертой или более высокой, не должно существенным образом сказываться на увеличении вероятности разрушения и на скорости выработки усталостного ресурса конструкций, поскольку составляющие спектров морского волнения с частотой, превышающей 1 Гц представляют собой неэнергоёмкие волны с малой амплитудой (порядка 10 см и менее), не способные оказывать существенного силового воздействия на опорные колонны СПБУ.

При условии, что сочетания свойств грунта под тремя колоннами описываются схемами НУП-СУП-НУП, СУП-НУП-НУП и СУП-НУП-СУП, получены значения собственных частот колебаний, которые представлены на рис. 4, а формы их колебаний представлены на рис. 3.

Отличие в характере собственных форм колебаний СПБУ с сочетаниями уровней податливостей грунта под опорами СУП-СУП-НУП от СУП-СУП-СУП:

- *первая форма*: корпус СПБУ движется, колебания опорных колонн происходят в горизонтальной плоскости  $XOY$ , которые расположены под углом около 135 градусов к координатным плоскостям;
- *вторая форма*: корпус СПБУ движется, колебания опорных колонн происходят в горизонтальной плоскости  $XOY$ , которые расположены под углом около 45 градусов к координатным плоскостям;
- *четвёртая форма*: корпус СПБУ движется в горизонтальной плоскости  $XOY$  и в вертикальной плоскости, колебания опорных колонн происходят под углом около 135 градусов к координатным плоскостям;
- *пятая форма*: корпус СПБУ движется, колебания опорных колонн происходят в горизонтальной плоскости  $XOY$  и в вертикальной плоскости, которые расположены под углом около 45 градусов к координатным плоскостям.

Отличие в характере первой и второй собственных форм колебаний СПБУ с сочетаниями уровней податливостей грунта под опорами СУП-НУП-НУП от СУП-СУП-СУП: дополнительно происходит вращение корпуса и опорных колонн вокруг вертикальной оси.

Отличие в характере собственных форм колебаний СПБУ в случае сочетаний свойств грунта НУП-СУП-НУП от СУП-СУП-СУП:

- *первая форма*: изгиб колонн и перемещение корпуса СПБУ происходит в плоскостях, параллельных  $XOZ$ ;
- *вторая форма*: изгиб колонн и перемещение корпуса СПБУ происходит в плоскостях, параллельных  $YOZ$ , а также происходит вращение вокруг вертикальной оси;
- *четвёртая форма*: изгиб колонн и перемещение корпуса СПБУ происходит в плоскостях, параллельных  $XOZ$ . У опоры с СУП наблюдаются вертикальные перемещения;
- *пятая форма*: изгиб колонн и перемещение корпуса СПБУ происходит в плоскостях, параллельных  $YOZ$ .

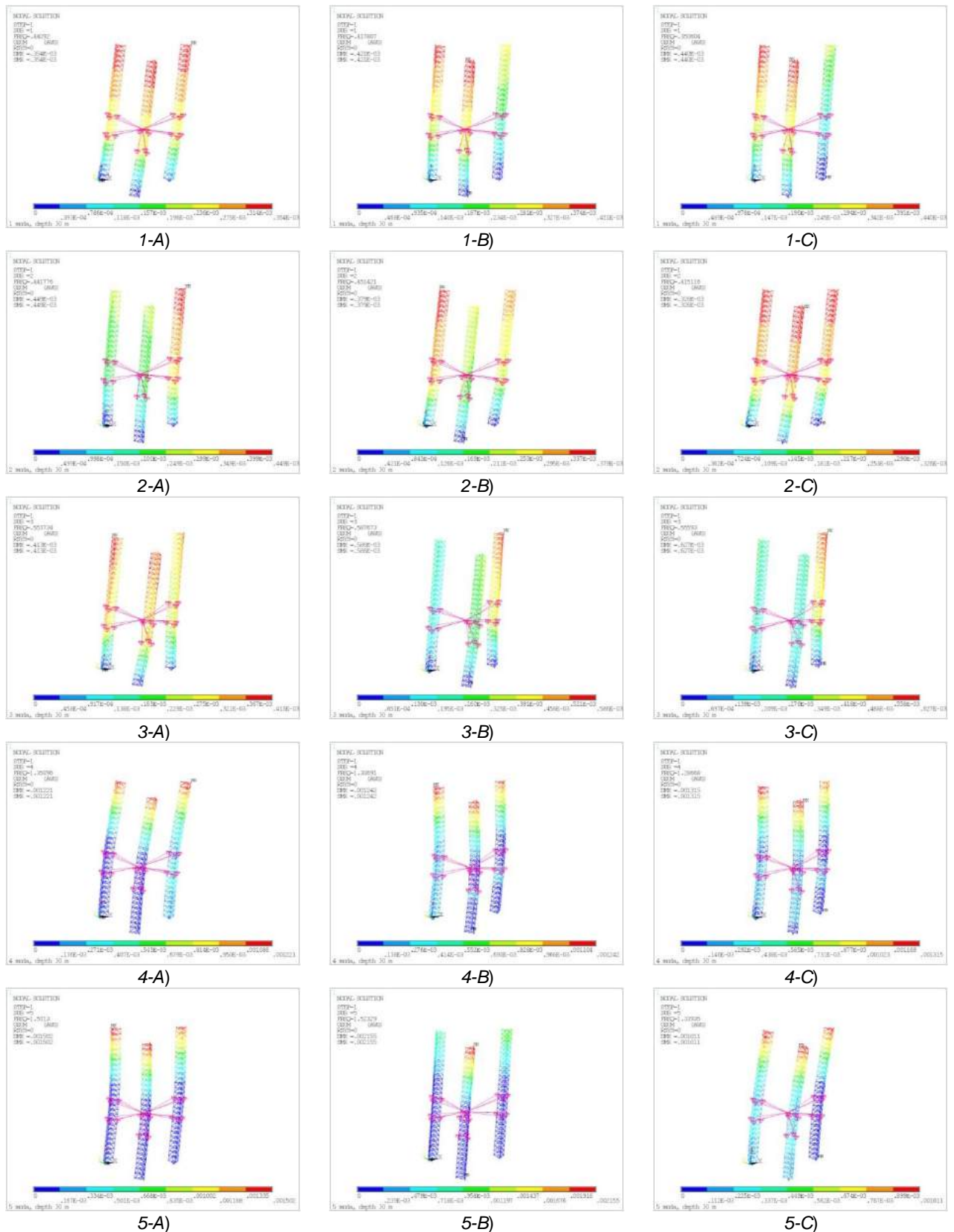


Рис. 3. Формы собственных колебаний СПБУ при глубине акватории 30 м. В обозначениях под отдельными фрагментами рисунка цифры соответствуют номерам форм, буквы – сочетаниям свойств грунта под каждой из трех колонн: А – НУП-СУП-НУП; В – СУП-НУП-НУП; С – СУП-НУП-СУП

Отличие в характере собственных форм колебаний СПБУ при сочетаниях свойств СУП-НУП-СУП от СУП-СУП-СУП:

– *первая форма*: дополнительно происходит вращение корпуса и опорных колонн вокруг вертикальной оси;

– *четвёртая форма*: изгиб колонн и перемещение корпуса СПБУ происходит в плоскостях, параллельных YOZ;

– *пятая форма*: изгиб колонн и перемещение корпуса СПБУ происходит в плоскостях, параллельных XOZ и в вертикальной плоскости.

Данные, приведенные на рис. 4 и 5, показывают, что при различных сочетаниях упругих свойств грунта под отдельными колоннами установки также наблюдаются ранее отмеченные особенности группирования собственных частот. Имеет место явно выраженный отрыв значений трех низших частот от значений, характерных для более высоких тонов колебаний.

**Заключение**

В результате конечно-элементного анализа частот и форм собственных колебаний трехопорных буровых установок, получивших наибольшее распространение в отечественной практике создания самоподъемных платформ, установлено следующее:

- основные особенности деформирования конструкций СПБУ при реализации низших собственных форм колебаний;
- влияние глубин акваторий в точках бурения и упругих свойств грунта на собственные частоты и формы колебаний СПБУ;
- закономерности группирования низших частот СПБУ и существенный отрыв значений трех низших собственных частот от значений, характерных для более высоких тонов колебаний;
- особая роль трех низших форм колебаний и необходимость их учёта в расчётах прочности и ресурса конструкций СПБУ, связанная с резонансными колебаниями установок при воздействии на них морского волнения.

**Литература**

1. Караев Р.Н., Разуваев В.Н., Портной А.С. Океанотехника и морские операции на шельфе: Учебник для вузов /Под общей редакцией почетного доктора Р.Н. Караева и проф. П.А. Шауба. – СПб.: Моринтех, 2008, 520 с.
2. Морские нефтегазодобывающие платформы: история, современность, перспективы. Аналитический обзор /Под общей редакцией М.А. Загородникова. – СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2016, 352 с.
3. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. – СПб, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 2018.
4. Ясюк В.Н., Лившиц Б.Р., Витрик В.Г., Яремийчук Р.С. Самоподъемные плавучие буровые установки: учебное пособие. – Львов: Центр Европы, 2011, 436 с.
5. DNVGL-RP-C203. "Fatigue design of offshore steel structures", 2016.

**References**

1. Karaev R.N., Razuvaev V.N., Portnoy A.S. Okeanotekhnika i morskije operacii na shelfe, uchebnik dlya vuzov. Pod obschey redakciey pochetnogo doctora R.N. Karaevai prof. P.A. Shauba. SPb, Morinteh, 2008, 520 s.
2. Morskije neftegazodobyvauschie platformy, istoriya, sovremennost, perspektivy. Analiticheskiiobzor. Pod obscheyredakciey M.A. Zagorodnikova. SPb, FGUP «Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi centr», 2016, 352 s.
3. Pravila klassifikacii, postroiiki i oborudovaniija plavuchih burovih ustanovok I morskikh stacionarnyh platform. SPb, FAU «Rossyskiymorskoyregistrssudoходства», 2018, 492 s.
4. Yasuk V.N., Libshic B.R., Vitrik V.G., Yaremiichuk R.S. Samopodemnye plavuchie burovyie ustanovki, uchebnoe posobie. Lvov, Centr Evropy, 2011, 436 s.
5. DNVGL-RP-C203. "Fatigue design of offshore steel structures", 2016.

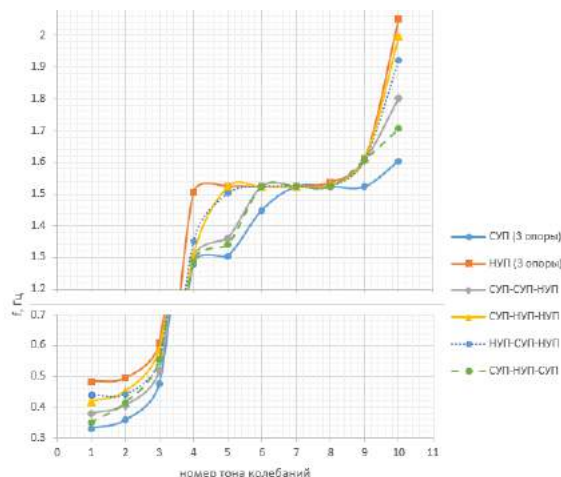


Рис. 4. Зависимость собственных частот СПБУ от номера тона колебаний и от упругих свойств грунта при глубине акватории 30 м

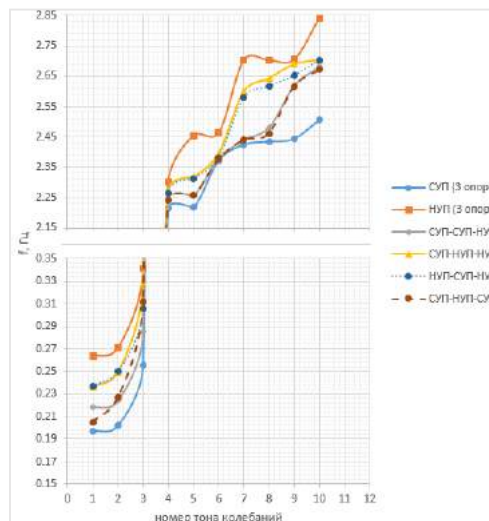


Рис. 5. Зависимость собственных частот СПБУ от номера тона колебаний и от упругих свойств грунта при глубине акватории 70 м

УДК 629.12.073.243.4

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ ВОЛНОВОГО ДРЕЙФА, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ СОВМЕСТНОЙ КАЧКЕ ДВУХ СУДОВ НА НЕРЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ В УСЛОВИЯХ МЕЛКОВОДЬЯ

**Виктория Юрьевна Семенова**

Д.т.н., профессор, заведующая кафедрой теории корабля  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лотманская, 10  
тел: 8-905-229-71-98, e-mail: sem\_viktorial@mail.ru

**Аунг Мьо Тхант**

аспирант  
(Санкт-Петербургский государственный морской технический университет).  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лотманская, 10  
tel: +7 (951) 661-25-01 e-mail: aungmyothant.amt@mail.ru

### Аннотация

В статье рассматривается определение сил и моментов волнового дрейфа, возникающих при совместной качке двух судов в условиях мелководья на нерегулярном волнении на основании ранее разработанного авторами метода, основанного на применении трехмерной потенциальной теории. Особое внимание уделяется исследованию влияния изменения расстояния между различными судами при их параллельном расположении на значения всех шести составляющих сил волнового дрейфа при качке на различных курсовых углах. Расчеты приведены для разных пар судов. Анализ полученных результатов показывает значительное увеличение всех составляющих дрейфовых сил и моментов при расположении судов параллельно друг другу при уменьшении расстояния между ними. Показано влияние гидродинамического взаимодействия при качке на встречном нерегулярном волнении, проявляющееся в появлении поперечных сил волнового дрейфа, кренящих и разворачивающих моментов, отсутствующих при качке изолированного судна. Данные составляющие увеличиваются при уменьшении расстояния между бортами судов. Делается вывод о необходимости учета всех составляющих сил и моментов волнового дрейфа, действующих на меньшее по размерам судно.

**Ключевые слова:** мелководье, совместная качка, спектральный метод, силы волнового дрейфа, гидродинамическое взаимодействие, нерегулярное волнение, курсовой угол.

## DETERMINATION OF WAVE DRIFT FORCES ARISING DURING SIMULTANEOUS MOTIONS OF TWO SHIPS ON IRREGULAR WAVES IN SHALLOW WATER

**Victoria Y. Semenova**

Ph.D., Professor, Head of the Ship Theory Department  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 10  
tel: 8-905-229-71-98, e-mail: sem\_viktorial@mail.ru

**Aung Myo Thant**

post-graduate student  
(St. Petersburg State Marine Technical University).  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 10  
tel: +7 (951) 661-25-01, e-mail: aungmyothant.amt@mail.ru

### Abstract

The article reviews determination of forces and moments of wave drift arising during simultaneous motions of two ships in shallow water conditions on irregular waves based on the method previously developed by the authors, based on the use of three-dimensional potential theory. Particular attention is paid to the study of the effect of changes in the distance between different ships, when they are parallel, to the values of all six components of the forces of the wave drift during motions at different wave angles. Calculations are given for different pairs of ships. An analysis of the results shows a significant increase in all components of the drift forces and moments when ships are parallel to each other and the distance between them decreases. The effect of hydrodynamic interaction during motions in irregular head seas is shown, which manifests itself in the appearance of athwartship forces of the wave drift, heeling and turning moments, which are not found during motions of an isolated ship. These components increase with decreasing distance between the boards of ships. It is concluded that it is necessary to take into account all the components of forces and moments of wave drift acting on a smaller vessel.

**Keywords:** shallow water, simultaneous motions, spectral method, wave drift forces, hydrodynamic interaction, irregular waves, wave angle.



**Введение**

В работе авторов [ 1 ] было рассмотрено определение сил волнового дрейфа, возникающих при совместной качке двух судов в условиях регулярного волнения. Однако , особый интерес для задач мореходности представляет определение данных сил в условиях реального нерегулярного волнения при различной его балльности .

Изучению данного вопроса и посвящена настоящая работа.

**1.Описание расчетной методики**

Для расчета силы и момента волнового дрейфа на двумерном нерегулярном волнении заданной интенсивности используются выражения (1):

$$\bar{F}_{A,B}(\beta) = 2 \cdot \int_0^\infty \frac{F_{A,B}(\beta, \omega)}{a_w^2} \cdot S_{\zeta w}(\omega) d\omega$$

$$\bar{M}_{A,B}(\beta) = 2 \cdot \int_0^\infty \frac{M_{A,B}(\beta, \omega)}{a_w^2} \cdot S_{\zeta w}(\omega) d\omega \quad (1)$$

где  $F_{A,B}(\beta, \omega)$  и  $M_{A,B}(\beta, \omega)$  –силы и момента волнового дрейфа, полученные на регулярном волнении в зависимости от курсового угла  $\beta$  и частоты волнения для судна А и судна В .

Определение дрейфовых сил и моментов на регулярном волнении производится по формулам [ 1 ].

**2.Анализ результатов**

Для апробации разработанного алгоритма и программы расчета, горизонтальные силы волнового дрейфа, действующие на неподвижные прямоугольную баржу и судно Wigley были сопоставлены с экспериментальными данными Kashiwagi [4]. Из приведенного на рис.1 сопоставления результатов видно их хорошее согласование.

При увеличении расстояния между судами значения дрейфовых сил, действующих на первое и второе судно, должны совпадать с соответствующими значениями дрейфовых сил, действующих на изолированные суда. Поэтому, в целях верификации разработанной программы , были проведены расчеты дрейфовых сил, возникающих при совместной качке сухогруза Новгород и лихтеровоза Алексей Косыгин на косом встречном волнении при расстоянии  $d=10000$ м между бортами и сопоставлены со значениями дрейфовых сил, возникающих при качке изолированных судов. Из проведенного сопоставления результатов, приведенного на рис.2 видно полное согласование результатов всех составляющих сил и моментов волнового дрейфа, как для первого судна, так и для второго.

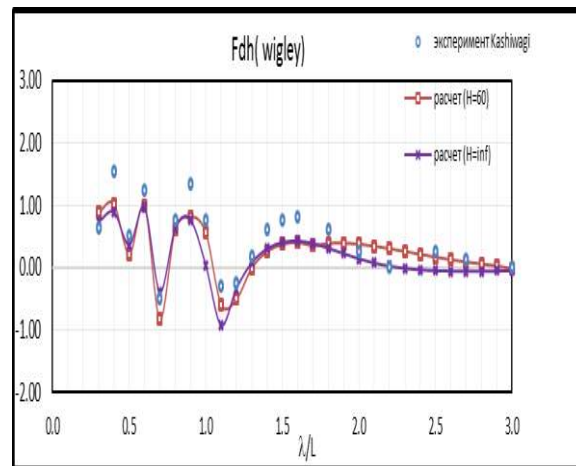
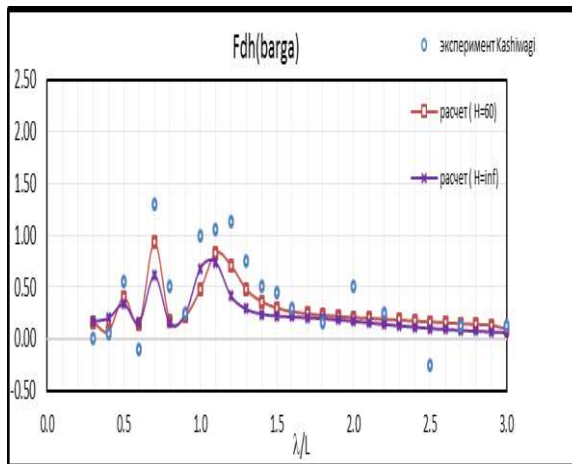
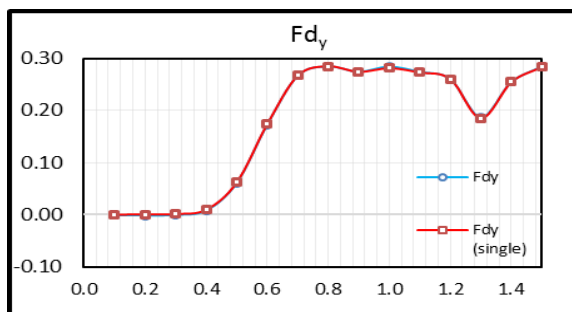
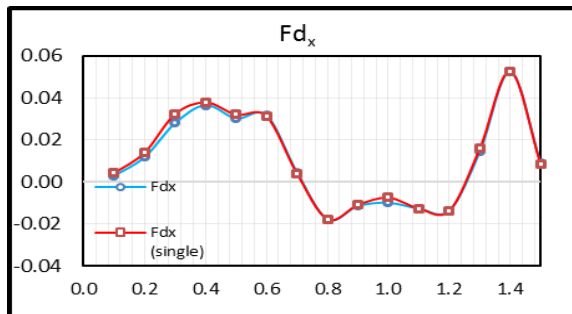
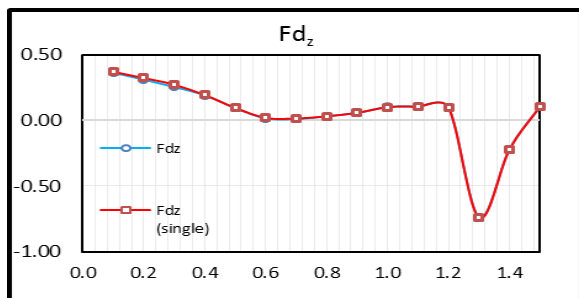
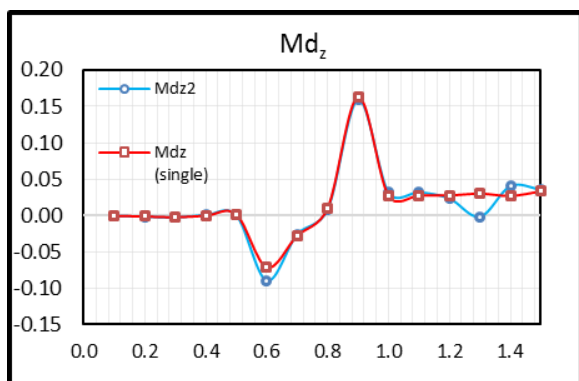
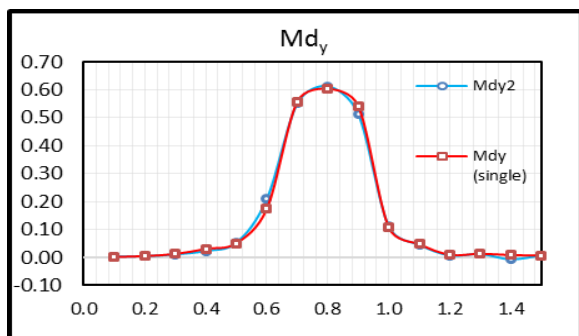
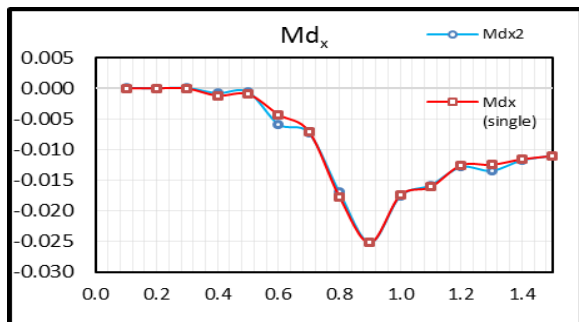


Рис.1 Значения горизонтальных сил волнового дрейфа, действующих на судно Wigley и баржу в сравнении с экспериментом Kashiwagi





А) Силы волнового дрейфа, действующие на лихтеровоз Алексей Косыгин



Б) Моменты волнового дрейфа, действующие на сухогруз Новгород

Рис.2 Значения сил и моментов волнового дрейфа, возникающих при совместной качке лихтеровоза Алексей Косыгин и сухогруза Новгород. ( $H=20\text{м}$ ,  $\beta=135$ ,  $d=10000\text{м}$ )

Расчеты дрейфовых сил на нерегулярном волнении проводились на основании выражений (1) с учетом ранее полученных расчетов на регулярном волнении. Расчеты проводились в зависимости от изменения расстояния между судами и балльности для различных сочетаний значений курсового угла и

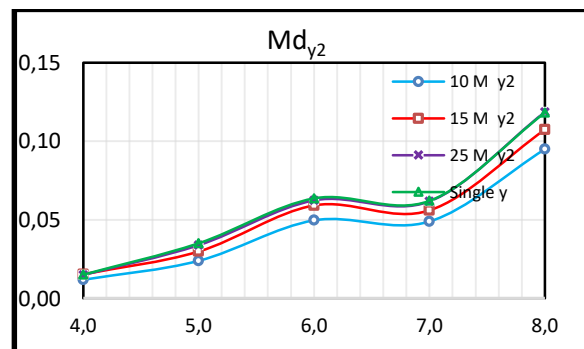
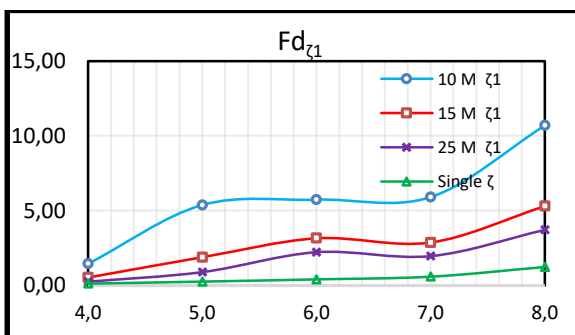
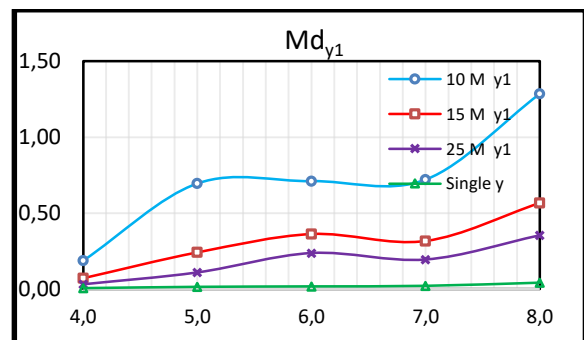
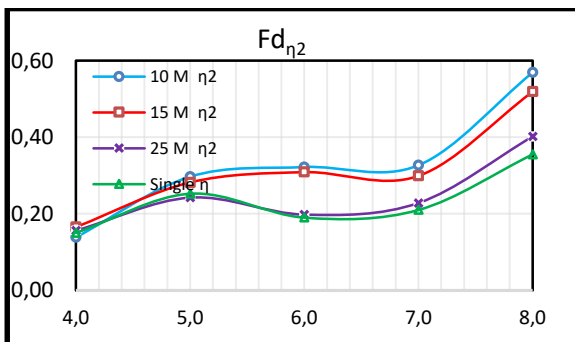
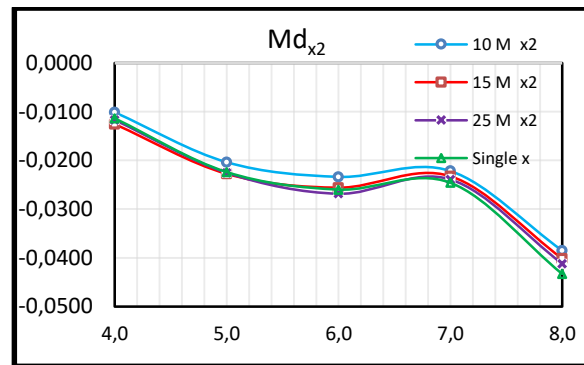
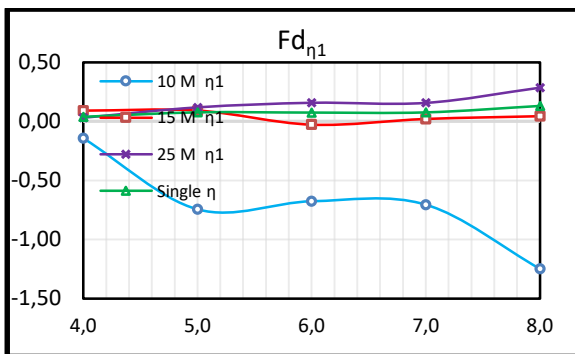
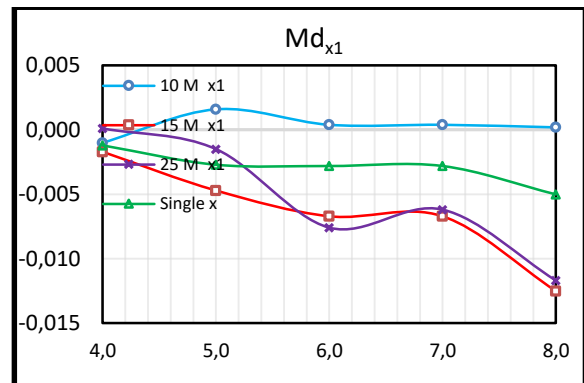
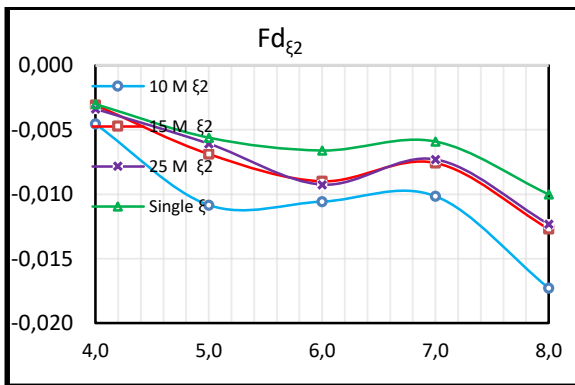
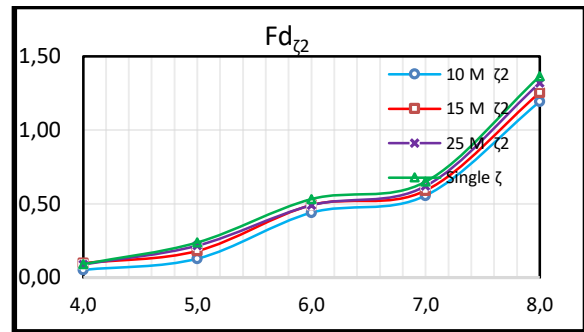
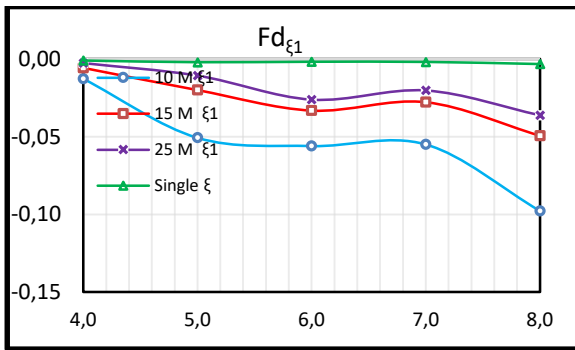
глубины. Полученные результаты сопоставлялись с результатами расчетов сил волнового дрейфа на нерегулярном волнении для случая качки изолированного судна.

На рис.3-4 приведены результаты расчетов сил и моментов волнового дрейфа при расположении судов лагом. Поведение сил волнового дрейфа в условиях нерегулярного волнения показано на примерах совместной качки сухогруза Стахановец Котов и ледокола Севморпуть при  $\beta=90$  и лихтеровоза Алексей Косыгин и ледокола Севморпуть при  $\beta=270$ . Таким образом, в первом случае ледокол был с наветренной стороны, во втором - располагался с подветренной стороны.

При совместной качке сухогруза и ледокола изменение расстояния между ними незначительно влияет на вертикальную силу дрейфа, кренящий и дифференцирующий моменты большего по размерам ледокола (рис.3). Перечисленные составляющие практически совпадают с соответствующими силами и моментами волнового дрейфа для изолированного ледокола. Все остальные составляющие дрейфовых сил и моментов ледокола и особенно сухогруза значительно зависят от величины расстояния между бортами. Для сухогруза все шесть составляющих дрейфовых сил многократно увеличиваются при уменьшении расстояния. Например, при уменьшении расстояния с 25 м до 10 м на шестибалльном волнении происходит трехкратное увеличение вертикальной, продольной сил и дифференцирующего момента. Кренящий момент и поперечная сила при этом меняют знак на противоположный. Для ледокола в наибольшей степени уменьшение расстояния влияет на разворачивающий момент. Так, на шестибалльном и восьмибалльном волнении при  $d=10$  м моменты  $M_{dz}$  в 2 раза больше соответствующих моментов при  $d=25$  м (рис.3).

При качке лагом лихтеровоза и ледокола, имеющих одинаковые размеры, изменение расстояния влияет на все шесть составляющих сил и моментов, как первого судна, так и второго. При этом максимальное влияние изменения расстояния имеет место на шестибалльном волнении, что связано с совпадением максимумов зависимостей дрейфовых сил от частоты на регулярном волнении и максимумов спектров ТМА для расчетной глубины. Так, при наименьшем расстоянии  $d=10$  м значение поперечной силы, действующей на лихтеровоз  $F_{d_{\eta 1}}$  в 6 раз больше поперечной силы при  $d=25$  м, отношение вертикальных сил  $F_{d_{z1}}(d=10)/F_{d_{z2}}(d=25)=9$ . Аналогичное многократное увеличение значений наблюдается и для продольной силы, а также кренящего и дифференцирующего моментов (рис.4). Для ледокола на шестибалльном волнении имеет место трехкратное увеличение поперечной силы и пятикратное увеличение продольной силы дрейфа при уменьшении расстояния с  $d=25$  м до  $d=10$  м, а также смена знака на противоположный кренящего и дифференцирующего моментов.





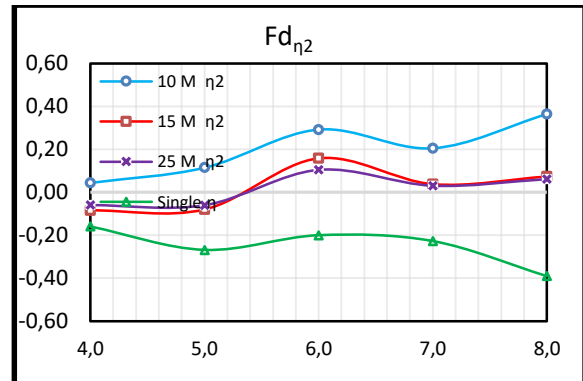
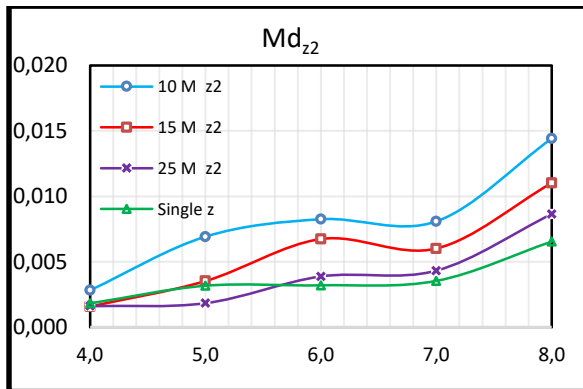
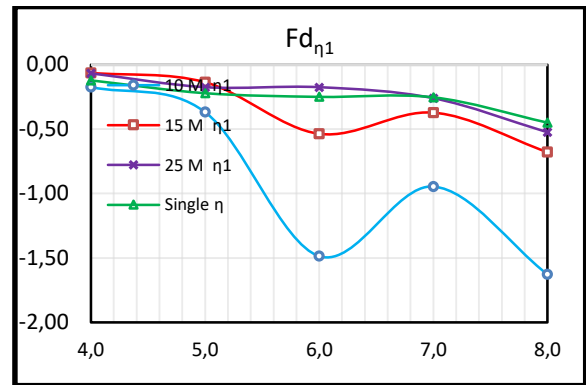
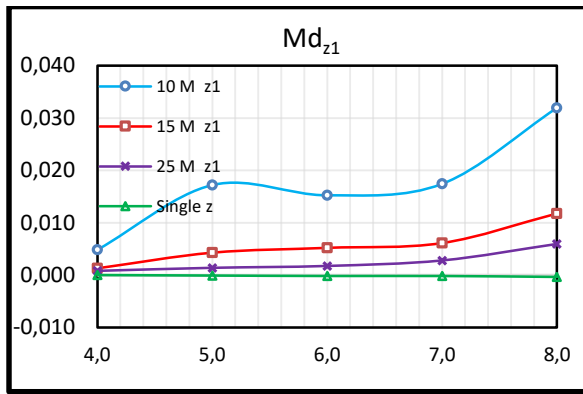
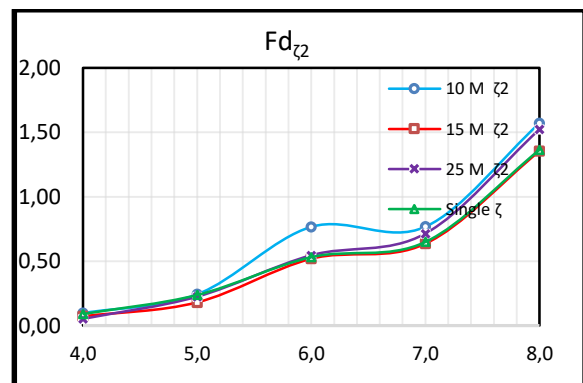
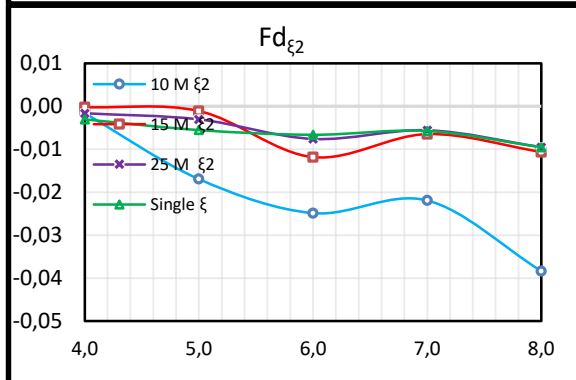
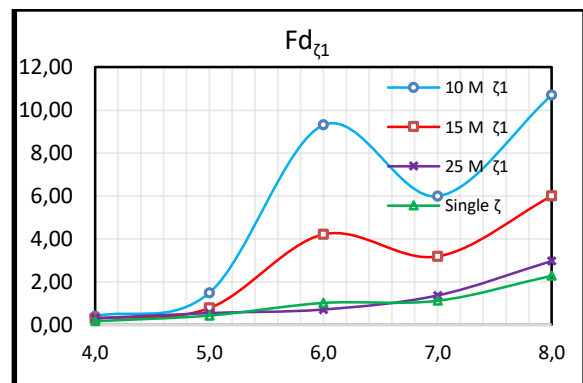
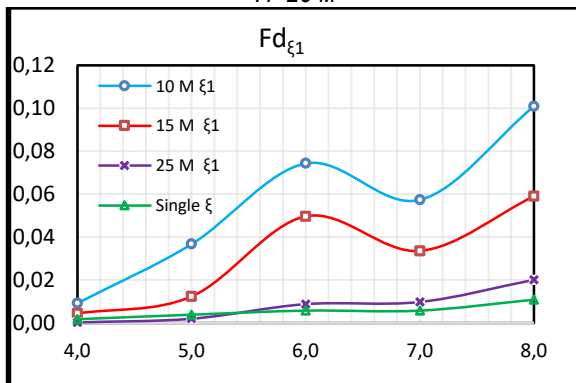


Рис.3 Значения составляющих сил волнового дрейфа возникающих при совместной качке сухогруза Стахановец Котов и ледокола Севморпуть на нерегулярном волнении в зависимости от изменения расстояния при  $\beta=90$ ,  $H=20$  м



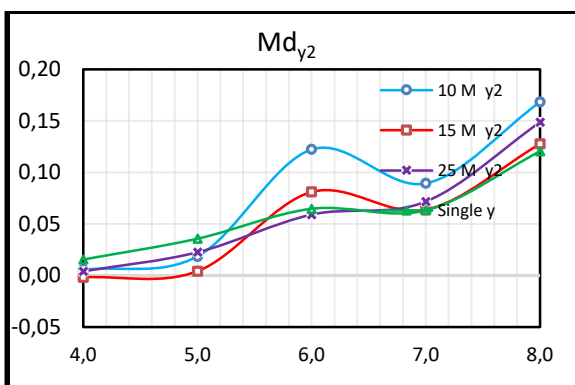
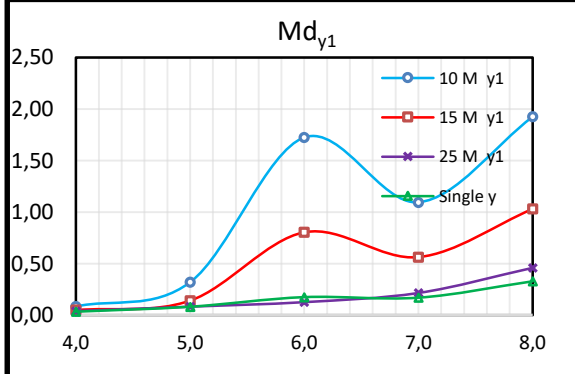
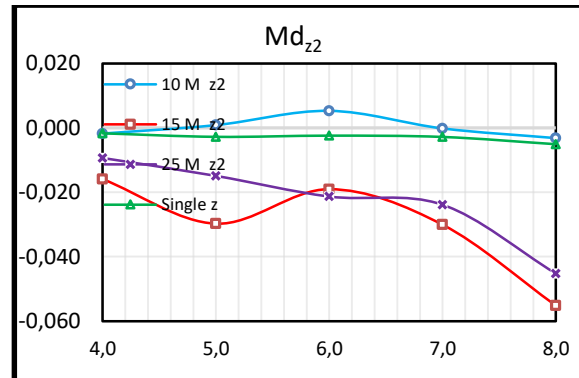
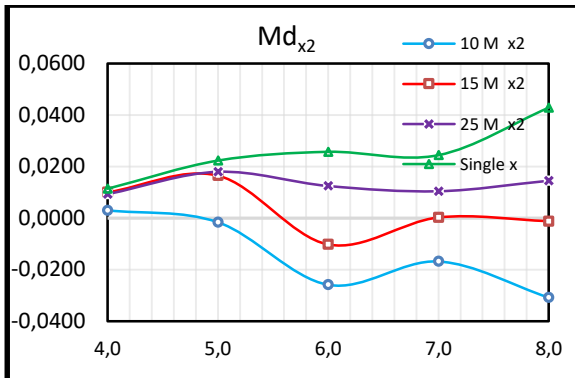
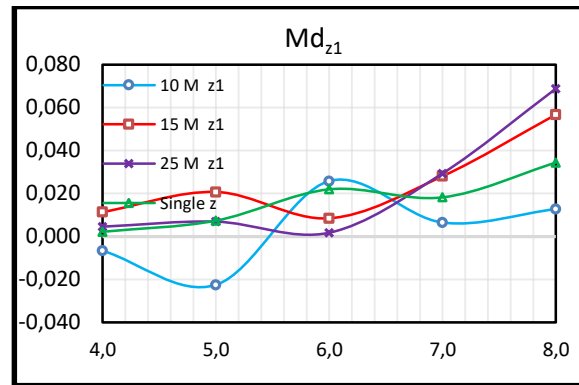
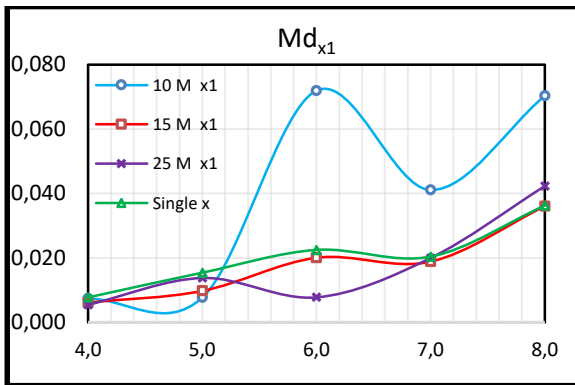
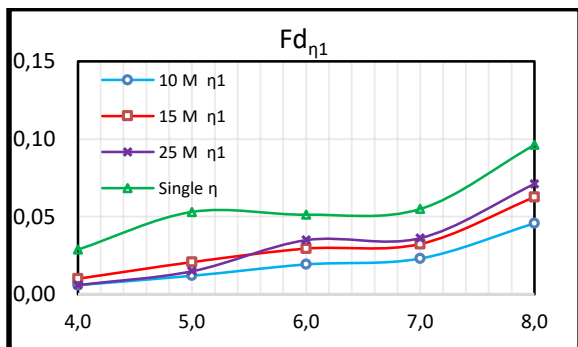
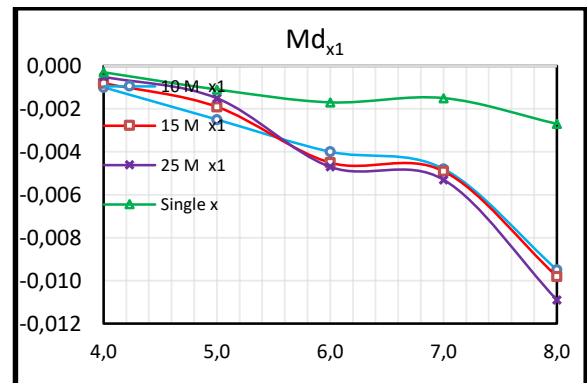
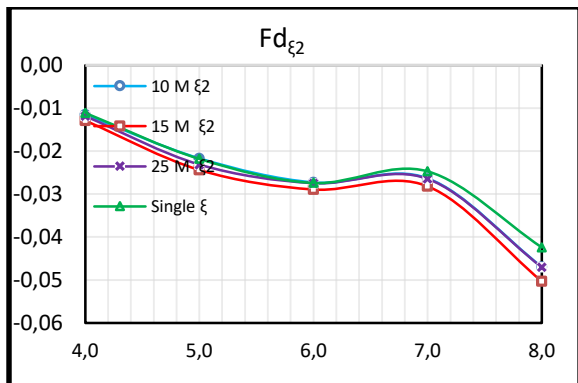
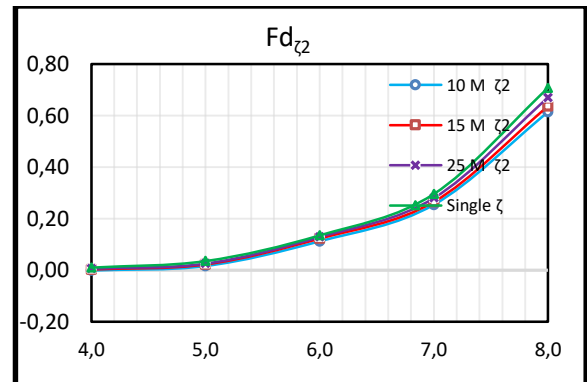
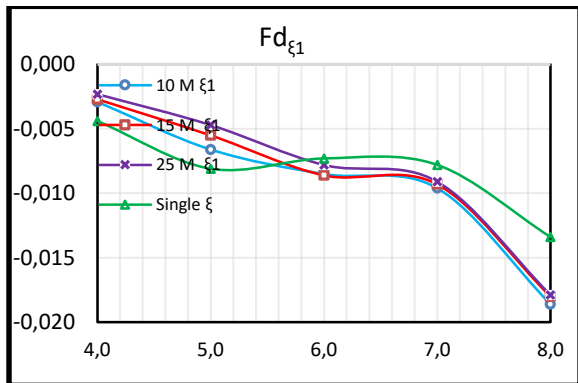
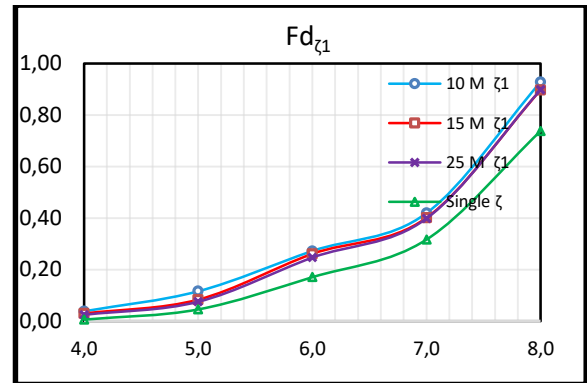
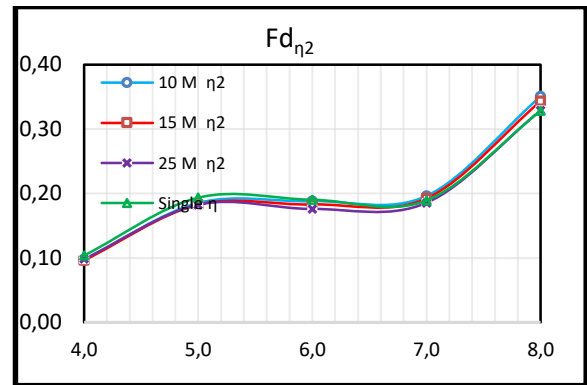


Рис.4 Значения составляющих сил волнового дрейфа возникающих при совместной качке лихтеровоза Алексей Косыгин и ледокола Севморпуть на нерегулярном волнении в зависимости от изменения расстояния при  $\beta=270$ ,  $H=20$  м

Расчеты сил волнового дрейфа на косом встречном нерегулярном волнении представлены на рис.5 для сухогруза Стахановец Котов и ледокола Севморпуть. Изменение расстояния между судами не влияет на все шесть составляющих сил и моментов волнового дрейфа, действующих на больший по размерам ледокол. Для сухогруза, находящегося в тени ледокола характерно уменьшение большинства составляющих дрейфовых сил по сравнению с соответствующими силами, действующими на изолированное судно. Для других пар судов при совместной качке на косом нерегулярном волнении наблюдается в большинстве случаев увеличение дрейфовых сил и моментов при уменьшении расстояния.

Пример расчета дрейфовых сил на встречном нерегулярном волнении приведен на рис.6 для лихтеровоза Алексей Косыгин и сухогруза Новгород. Из приведенных результатов видно, что уменьшение расстояния между судами приводит к увеличению по абсолютному значению продольных и вертикальных сил и дифференцирующих моментов. Например, на семибалльном волнении при расстоянии  $d=8$  м продольная сила, действующая на сухогруз Новгород в 4 раза больше соответствующей силы при расстоянии  $d=30$  м, вертикальная сила при  $d=8$  м в 3 раза больше вертикальной силы при расстоянии  $d=30$  м (рис.6). Увеличение перечисленных составляющих дрейфовых сил при уменьшении расстояния происходит и для лихтеровоза Алексей Косыгин, но в меньшей степени.

Отличительной особенностью совместной качки на встречном волнении является появление поперечных сил волнового дрейфа, а также кренящих и разворачивающих моментов. Данные силы и моменты в условиях нерегулярного волнения увеличиваются при уменьшении расстояния между судами на всем диапазоне изменения балльности волнения. Значения кренящих и разворачивающих моментов, действующих как на лихтеровоз так и на сухогруз малы по сравнению с дифференцирующими моментами. Однако, возникающие поперечные силы волнового дрейфа, действующие на лихтеровоз имеют один порядок с продольными силами, а поперечные силы, действующие на сухогруз соизмеримы с вертикальными силами. Так при наименьшем расстоянии  $d=8\text{м}$  значения поперечной силы  $F_{d\eta_2}$  совпадают с вертикальной силой  $F_{d\zeta_2}$ , что указывает на необходимость учета данных составляющих в отличие от качки изолированного судна.



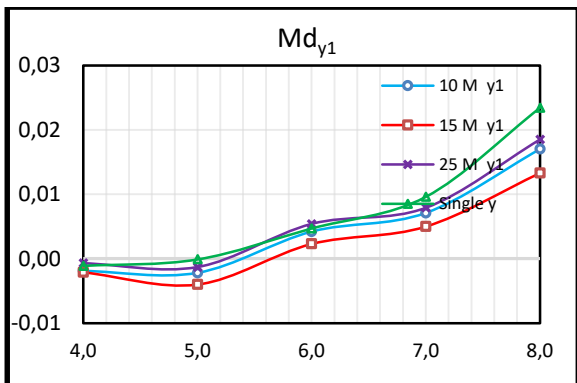
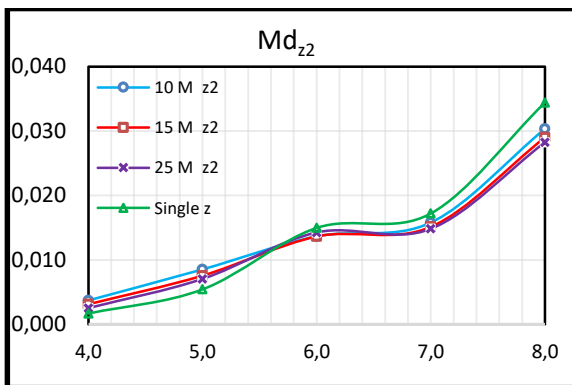
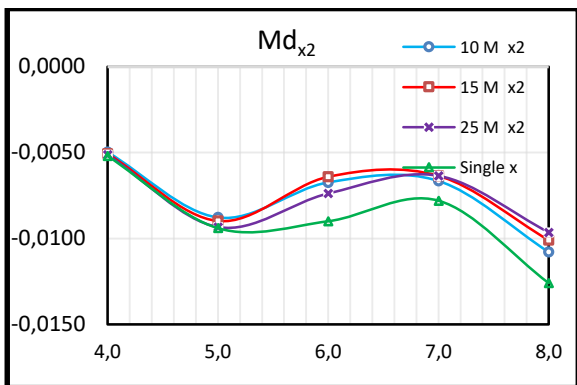
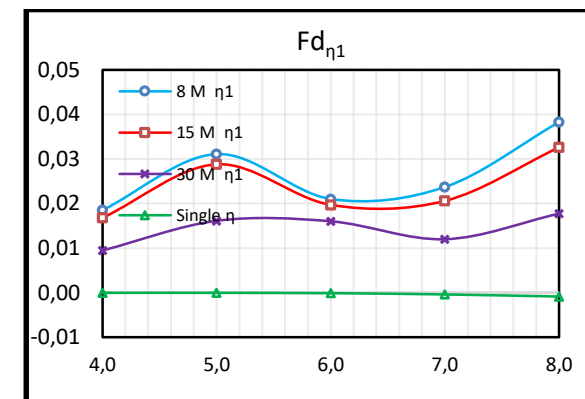
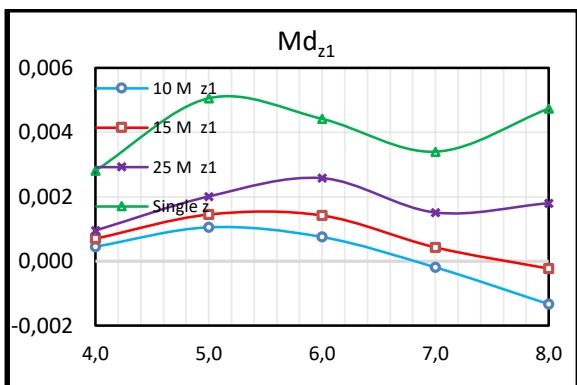
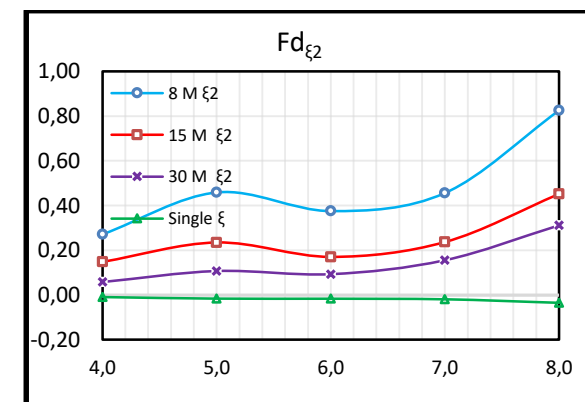
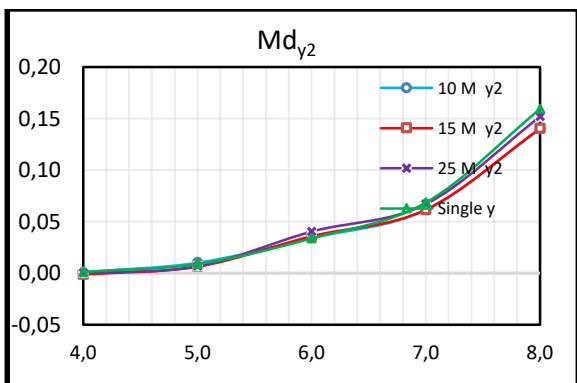
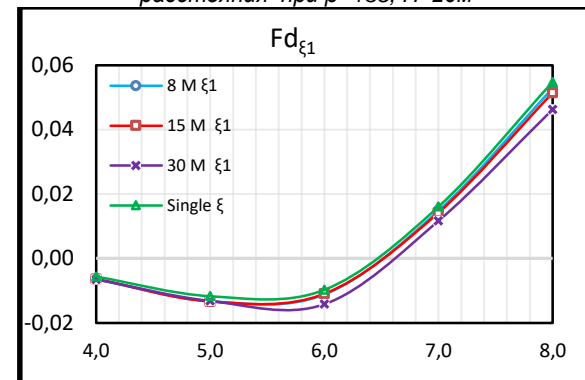


Рис.5 Значения составляющих сил волнового дрейфа возникающих при совместной качке сухогруза Стахановец Котов и ледокола Севморпуть на нерегулярном волнении в зависимости от изменения расстояния при  $\beta=135, H=20\text{м}$



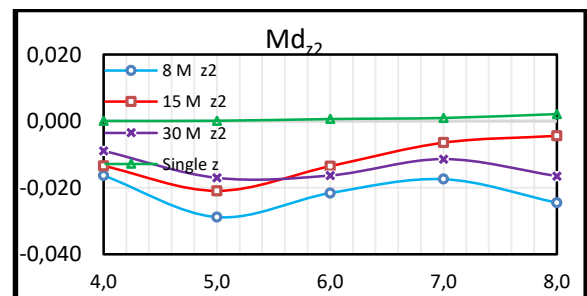
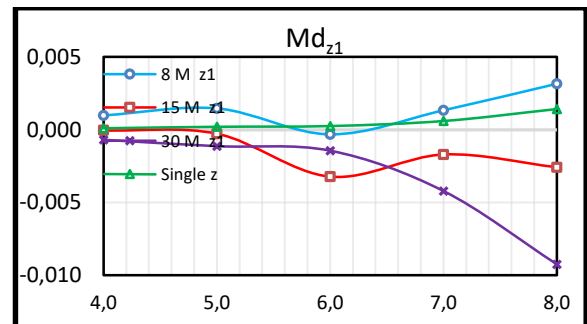
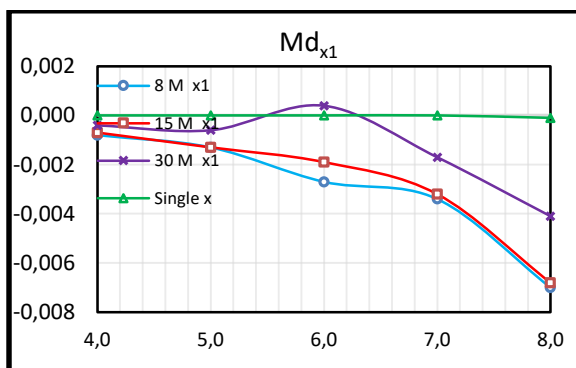
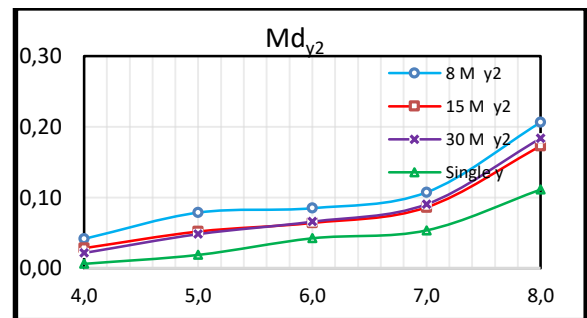
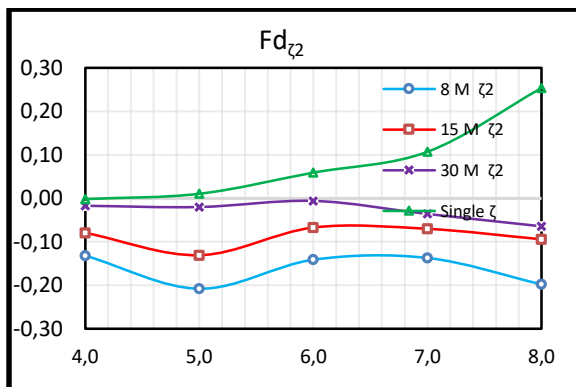
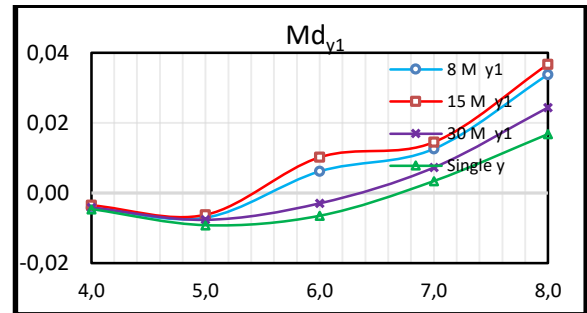
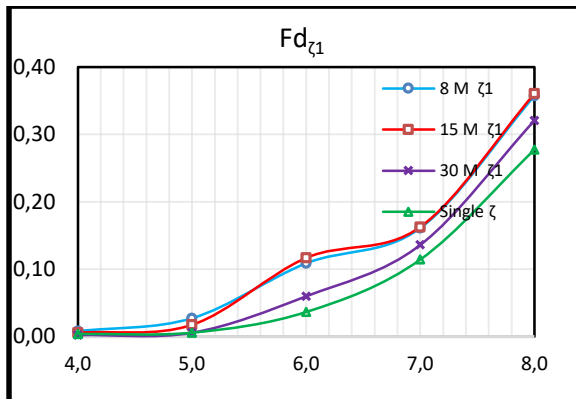
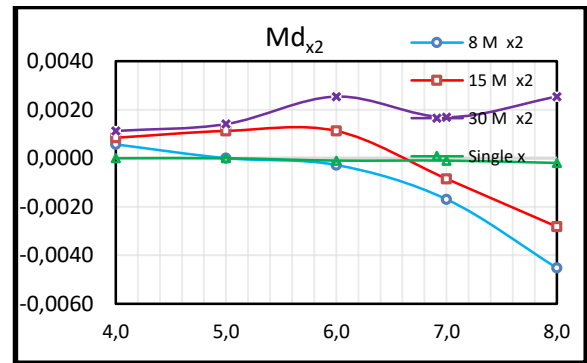
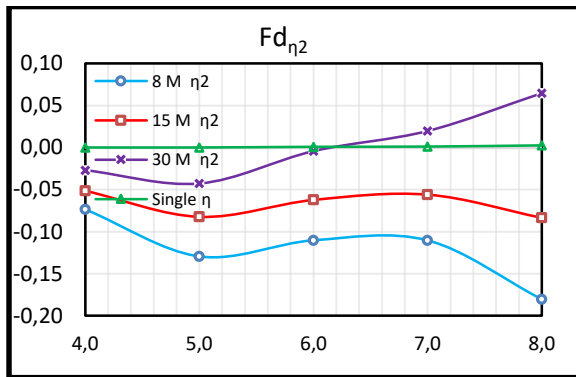


Рис.6 Значения составляющих сил волнового дрейфа возникающих при совместной качке лихтеровоза Алексей Косыгин и сухогруза Новгород на нерегулярном волнении в зависимости от изменения расстояния при  $\beta=180$ ,  $H=20$  м

**Заключение**

Таким образом, на основании проведенного анализа результатов расчетов совместной качки двух судов на нерегулярном волнении, можно сделать следующие основные выводы:

- 1) При совместной качке на нерегулярном волнении в большинстве случаев наблюдается увеличение значений всех шести составляющих сил волнового дрейфа при уменьшении расстояния между бортами

судов, особенно при курсовых углах  $\beta=90$  и  $\beta=270$ .

- 2) На встречном нерегулярном волнении в отличие от качки изолированного судна появляются поперечные силы волнового дрейфа, кренящие и разворачивающие моменты, значения которых увеличиваются при уменьшении расстояния. При этом поперечные силы могут быть соизмеримы с продольными и вертикальными силами.

**Литература**

1. Семенова В.Ю. Аунг Мьо Тхант (2017) Определение сил волнового дрейфа, возникающих при совместной качке двух на регулярном волнении в условиях мелководья Морские интеллектуальные технологии, № 4(38) Т.1 , стр.16-31
2. Kashiwagi. W (2005). Wave drift forces and moments on two ships arranged side by side in waves. Ocean Engineering, N32 p.529-555

**References**

1. Semenova V.Yu. Aung M'o Tkhant (2017) Opredelenie sil volnovoogo dreyfa, vznikayushchikh pri sovmestnoy kachke dvukh na regulyarnom volnenii v usloviyakh melkovod'ya Morskie in-tellektual'nye tekhnologii, № 4(38) Т.1 , str.16-31
2. Kashiwagi. W (2005). Wave drift forces and moments on two ships arranged side by side in waves. Ocean Engineering, N32 p.529-555

УДК 629.5

## О НОРМИРОВАНИИ УСКОРЕНИЙ ПРИ КАЧКЕ СУДОВ С ИЗБЫТОЧНОЙ ОСТОЙЧИВОСТЬЮ

**Рудольф Васильевич Борисов**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теории корабля  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: rv2borisov@mail.ru

**Александр Альфредович Лузянин**

кандидат технических наук, доцент кафедры теории корабля  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: luzianin52@mail.ru

### Аннотация

Для некоторых типов судов (суда смешанного плавания, крановые суда, суда дноуглубительного флота) вводятся ограничения по ускорениям при качке на взволнованном море, связанные либо с видом перевозимого груза, либо с назначением, либо с необходимостью выполнения тех или иных условий безопасной эксплуатации.

Чаще всего нормируются вертикальные ускорения от бортовой качки, причем допускаемые ускорения выбираются обычно с учетом биологических факторов. Это позволяет косвенным образом учесть пересыпание сыпучего груза, передвижки плохо закрепленного груза, особенно палубного, ухудшение условий работы механизмов, опасные напряжения в связях судового корпуса.

В «Нормах остойчивости» Российского морского регистра судоходства для целей нормирования введен специальный критерий ускорений.

В настоящей работе рассматривается возможность корректировки критерия ускорений и распространения его на другие типы судов при различных случаях загрузки.

**Ключевые слова:** ускорения, критерий ускорения, корректировка критерия ускорения

## ON NORMALIZATION OF ACCELERATIONS DURING MOTIONS OF STIFF VESSELS

**Rudolf V. Borisov**

Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Ship Theory Department of  
St. Petersburg State Maritime Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: rv2borisov@mail.ru

**Alexander A. Luzyanin**

PhD in Engineering Science, Associate Professor at the Ship Theory Department  
St. Petersburg State Maritime Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: luzianin52@mail.ru

### Abstract

For some types of vessels (vessels of mixed navigation, crane vessels, dredgers), restrictions are imposed on the acceleration during motions on a rough sea, associated either with the type of cargo being carried, or with the purpose, or the need to fulfill certain conditions of safe operation.

Vertical accelerations from rolling are normalized more often, and the permissible accelerations are usually chosen taking into account biological factors. This allows taking into account indirectly the pouring of bulk cargo, shifting of poorly fixed cargo, especially deck cargo, deterioration of working conditions of mechanisms, dangerous stresses in the ship hull braces.

In the "Standards of Stability" of the Russian Maritime Register of Shipping, a special criterion of accelerations is introduced for the purposes of stabilization.

This paper discusses the possibility of adjusting the criterion of acceleration and its extension to other types of vessels in various cases of stowage.

**Keywords:** acceleration, acceleration criterion, acceleration criterion adjustment

### Введение

В настоящее время существуют некоторые типы судов, для которых вводятся ограничения по ускорениям при качке на взволнованном море, связанные либо с видом перевозимого груза, либо с назначением, либо с необходимостью выполнения тех или иных условий безопасной эксплуатации (суда смешанного плавания, крановые суда, суда дноуглубительного флота и т.д.).

Чаще всего рассматриваются вертикальные ускорения от бортовой качки, однако иногда нормируются суммарные вертикальные ускорения в различных комбинациях видов качки: бортовая плюс вертикальная (на верхних палубах, на мостике), килевая плюс вертикальная (на носовом перпендикуляре), [1]. Отметим более подробно основные факторы, которые заставляют прибегать к нормированию ускорений.



1. Биологические. Качка вызывает у персонала и пассажиров «морскую болезнь». Основная причина укачивания – физиологическое влияние на человеческий организм угловых и линейных ускорений, возникающих при качке судна. Порог чувствительности людей к угловым ускорениям находится в пределах 2–3 град/с<sup>2</sup>, а к вертикальным 0,4 – 0,12 м/с<sup>2</sup>. Особенно интенсивно морская болезнь развивается, когда вертикальные ускорения достигают примерно 0,1g ≈ 1 м/с<sup>2</sup>. Вертикальные ускорения в конкретной точке судна являются следствием не только линейных, но и угловых колебаний. Поэтому наибольшие вертикальные ускорения бывают в оконечностях судна.

2. Эксплуатационные. К ним относятся смещение контейнеров, сыпучих и лесных грузов, раскачивание подвешенного груза на гаке плавучего крана, ухудшение, а иногда и невозможность работы главных и вспомогательных механизмов.

3. Прочностные. Общая прочность корпуса и прочность отдельных конструкций (носовых и кормовых оконечностей, конструкций кранов и грузовых стрел и т. д.).

Эксплуатационные и прочностные факторы для транспортных судов, в основном, учитываются в соответствующих разделах национальных и международных правил [2,3] для обеспечения безопасной технологии перевозок и морских операций. Эти нормативы по контролю устойчивости судов при перевозке зерновых и других навалочных грузов предусматривают оценку условий безопасной перевозки сыпучих грузов с косвенным учетом инерционных сил при качке.

Таким образом, разработчики ограничений для судов смешанного плавания [4] учли «...пересыпание сыпучего груза, передвижки плохо закрепленного груза, особенно палубного, ухудшение условий работы механизмов, укачивание судового экипажа, опасные напряжения в связях судового корпуса». При этом они как бы создали универсальное средство, учитывающее все три группы факторов, о которых мы говорили выше. Резкая порывистая качка часто вызывает морскую болезнь. Имеются различные теории, объясняющие ее возникновение, но большинство ученых-медиков склоняется к мысли, что морская болезнь вызывается

нарушением работы вестибулярного аппарата вследствие воздействия ускорений. Морская болезнь является прежде всего следствием воздействия вертикальных ускорений, которые вызываются в большей степени вертикальной и килевой качкой [5].

**Описание метода**

Критерий ускорения для судов с избыточной устойчивостью позволяет определять уязвимость избыточным ускорениям и вводить эксплуатационные ограничения по допустимой высоте волны 3%-ой обеспеченности для сухогрузных судов с параметрами  $\frac{\sqrt{h}}{B} \geq 0,08$  и  $\frac{B}{d} \geq 2,5$ , (где  $h$  – начальная поперечная мета-центрическая высота;  $B$  – ширина судна;  $d$  – осадка) и судов смешанного плавания.

В нормах Регистра СССР основные предложения в виде критерия ускорения для судов смешанного плавания были разработаны еще в 1971 г. Эти идеи с небольшими изменениями в методике расчета дожили до наших дней. Смысл их в следующем.

Устойчивость по критерию ускорения считается приемлемой, если в рассматриваемом состоянии нагрузки расчетное ускорение (в долях  $g$ ) не превышает допустимого значения, т. е. выполняется условие.

$$K^* = \frac{0,3}{a_{расч}} \geq 1,0$$

где  $K^*$  – критерий ускорения,

$a_{расч}$  – расчетное ускорение (в долях  $g$ ),

определяемое по формуле:

$$a_{расч} = 0,0105 \frac{h}{c^2 B} k_{\theta} \theta_r$$

Здесь  $\theta_r$  – расчетная амплитуда качки, град, определяемая в соответствии с п. 2.1.5 Норм,  $\theta_r = 109X_1X_2\sqrt{rS}$  так же как и в критерии погоды [3];

$c$  – инерционный коэффициент, определяемый в соответствии с 2.1.5.1 Норм при расчете критерия погоды

$$c = 0,373 + 0,023 \frac{B}{d} - 0,043 \frac{L}{100}; \quad (1)$$

$k_{\theta}$  – коэффициент, учитывающий особенности качки судов смешанного плавания, определяемый по таблице 1.

Таблица 1

$B/d$	≤ 2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	≥ 6,5
$k_{\theta}$	1,0	1,08	1,11	1,11	1,20	1,30	1,45	1,56	1,61

В отдельных случаях по обоснованному представлению судовладельца Регистр может допустить эксплуатацию судна при критерии ускорения  $K^* < 1$ . В этих случаях вводится дополнительное ограничение по высоте волны. При

этом высота волны 3%- обеспеченности определяется в зависимости от критерия  $K^* < 1$  по таблице 2. Конкретные варианты нагрузки при  $K^* < 1$  должны быть приведены в Информации об устойчивости.

Таблица 2.

Величина  $K^*$

$K^*$	1,0 и более	1,0 – 0,75	0,75 и менее
Высота волны 3%- обеспеченности, м	6,0	5,0	4,0

При расчете критерия предполагается, что судно расположено лагом к набегающему волнению и

испытывает бортовую и вертикальную качку. Вертикальные ускорения оцениваются на мидель

шпангоуте в точке пересечения борта с действующей ватерлинией.

Как известно, формула для амплитуды качки  $\theta_r$  представляет собой приведенную к удобному расчетному виду формулу нелинейной теории качки, которая была использована авторами «Норм устойчивости для пассажирских судов» Японии, а затем откорректирована специалис-тами Подкомитета SLF с тем, чтобы учесть влияние  $B/d$ ,  $C_B$  и скуловых килей на демп-фирование бортовой качки более детально. При этом в формуле для  $\theta_r$  множители  $r$  и  $s$  взяты прямо из Японских «Норм», а множители  $X_1(B/d)$ ,  $X_2(C_B)$  и  $k$  – из «Норм устойчивости» Российского морского регистра судоходства.

Рассмотрение величины  $r$  показало, что она представляет собой осредненный по резуль-татам массовых расчетов японских пассажирских судов редуцированный коэффициент к главной (крыловской) части возмущающего момента, который учитывает конечность ширины и осадки судна, по сравнению с длиной набегающих волн. Из теории качки хорошо известно, что этот коэффициент изменяется от нуля (очень короткие волны) до единицы (предельно длинные волны). Именно так изменяется эффективный коэффициент волнового склона (по терминологии японских «Норм»), рассчитанный по методу Ватанабе для 60 пассажирских судов Японии и лежащий в основе линейной статистической зависимости «Кодекса»:  $r = 0,73 \pm 0,6OG / d$ , где  $OG$  – расстояние между центром тяжести и ватерлинией (плюс для случая, когда центр тяжести расположен выше ватерлинии).

Расчеты по другим типам судов с высоко расположенным центром тяжести, прежде всего, грузовых и судов технического флота, показали, что в ряде случаев величина  $r$  получается больше единицы, что не соот-ветствует ее физическому смыслу и приводит к неоправданному завышению амплитуд качки  $\theta_1$ . Так, для грузового судна ( $L = 65,0$  м,  $B = 10,0$  м,  $C_B = 0,66$ ) при условиях загрузки «судно

без груза с 10% запасов» ( $d = 2,42$  м,  $OG = 1,34$  м,  $GM = 0,88$  м) получается  $r = 1,06$ , а для кранового судна ( $L = 80,4$  м,  $B = 25,4$  м,  $C_B = 0,60$ ) в условиях перехода ( $d = 3,91$  м,  $OG = 3,65$  м,  $GM = 10,7$  м) получаем  $r = 1,29$ , что приводит к расчетной амплитуде качки  $\theta_r = 29^\circ$ , не наблюдававшейся в практике эксплуатации этого судна. Предлагается в случаях, когда вычисленное  $r$  оказывается большим единицы, принимать в расчете амплитуды  $\theta_1$  величину  $r = 1$ .

Анализ зависимости  $X_1(B/d)$  показал, что при использованной в «Кодексе ИМО» схеме рас-чета амплитуды  $\theta_r$  эта зависимость должна учитывать только тот факт, что с ростом  $B/d$  коэффициент демпфирования бортовой качки увеличивается, о чем свидетельствуют результаты много-численных модельных испытаний, проведенных в разных странах, в том числе и в России. Между тем, в табл. 2.3.4-1 «Кодекса ИМО» величина фактора  $X_1$  при любых  $B/d \geq 3,5$  ограничена его предельным значением  $X_1 = 0,8$ . Такое ограничение соответствовало физической и расчетной схемам «Норм устойчивости» Российского морского регистра судоходства, но не отвечает расчетной схеме для амплитуд качки  $\theta_1$  «Кодекса ИМО». Использование экспериментальных данных по коэффициентам демпфирования бортовой качки, полученных в опытовом бассейне Ленинградского Корабле-строительного института для различных типов судов в широком диапазоне отношений ширины к осадке, позволило вполне обоснованно про-должить зависимость  $X_1(B/d)$  в область  $B/d > 3,5$ , доведя ее до  $B/d = 7,0$ , практически исчерпывающего реальные значения отношений ширины к осадке для широкого класса морских судов, включая грузовые и суда технического флота. Такая зависимость пред-ставлена табл. 3, пролонгирующей табл. 2.3.4-1 «Кодекса ИМО». Она получена путем осреднения результатов расчета фактора  $X_1$  по 15 – ти типам грузовых и промысловых судов, а также судов технического флота (крановые и дноуглубительные).

Таблица 3.

Величина фактора  $X_1$ .

$B/d \leq 2,4$	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	$\geq 6,5$	
$X_1$	1,0	0,98	0,96	0,95	0,93	0,91	0,90	0,88	0,86	0,84	0,82	0,80	0,79	0,78	0,76	0,72	0,68	0,64	0,62

**Анализ результатов**

Видно, что использование таблицы 3 для фактора  $X_1$  в формуле амплитуды качки всегда приводит к снижению величины  $\theta_r$ , тем боль-шему, чем больше  $B/d$ , в соответствии с физи-ческой картиной явления. Это снижение стано-вится практически ощутимым, начиная с  $B/d > 4,0$ . Такие соотношения между шириной и осад-кой, как показывает статистический анализ главных размерений современных морских судов, характерны для грузовых судов при стандартных условиях загрузки «судно без груза в балласте, с 10 % запасов» (сухогрузные, танкеры), крупных промысловых судов (рыбоконсервные заводы, китобазы) с небольшим количеством продукции в трюмах и почти израсходованными запасами и для судов технического флота (крановые, дноуглубительные, буровые) в условиях перехода, когда отношение  $B/d$  зачастую превышает (5,0 – 6,0). Именно для них корректировка таблицы 1 имеет

наибольшее значение и может снизить расчетные амплитуды качки на (15-20)%.

При вычислении амплитуд качки по методике ИМО [3] используется формула:

$$c = 0,373 + 0,023B/d - 0,043L/100 . \quad (2)$$

Она была получена для судов неограниченного района плавания, у которых отношение ширины к осадке обычно  $B/d < 3,5$ , а относительная метацентрическая высота  $\frac{\sqrt{h}}{B} < 0,08$ . Применение этой зависимости для судов смешанного плавания, для которых характерны большие отношения  $B/d$  и метацентрические высоты, приводит к существенной погрешности.

Для судов различной длины, но с одина-ковыми  $B/d$ , формула (2) дает существенно отличающиеся значения коэффициента  $c$  и, соответственно, периода качки. Так для судна длиной  $L = 100$  м,  $B/d =$

2,5,  $\frac{\sqrt{h}}{B} = 0,06$  получим:  $c = 0,399$ ,  $T = 12,9$  с, а для

судна длиной  $L = 200$  м, при тех же  $B/d = 2,5$ ,  $\frac{\sqrt{h}}{B} =$

0,06:  $c = 0,345$ ,  $T = 11,5$  с. Разница составляет порядка 10%, Очевидно, что с ростом длины судна погрешность вычислений будет увеличиваться.

Собственный период бортовой качки определяется известной зависимостью:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_{xx} + \lambda_{44}}{Dh}}, \quad (3)$$

где  $I_{xx}$  – момент инерции массы судна относительно центральной продольной оси ОХ;

$\lambda_{44}$  – присоединенный момент инерции;

$D$  – весовое водоизмещение судна.

Из равенства  $T = \frac{2cB}{\sqrt{h}}$  [3] и (3) коэффициент  $c$

можно определить выражением:

$$c = \frac{\pi}{B} \sqrt{\frac{I_{xx} + \lambda_{44}}{D}}. \quad (4)$$

Для его определения необходимо знать момент инерции массы судна относительно центральной продольной оси и присоединенный момент инерции.

Наиболее точно определить момент инерции массы судна  $I_{xx}$  можно путем подсчета моментов инерции составляющих нагрузки масс (наружная обшивка, набор палубы, надстройка, грузы, топливо, запасы и т. д.). Для этого используется известная формула теоретической механики:

$$I_{xx} = \sum_i m_i [y_i^2 + (z_i - z_g)^2] + \sum_i I_{xi}^c, \quad (5)$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -ой статьи нагрузки;

$y_i$  – ордината ее центра тяжести относительно ДП;

$z_i$  – аппликата ее центра тяжести относительно основной плоскости;

$I_{xi}^c$  – собственный момент инерции  $i$ -й статьи нагрузки.

Расчет по формуле (5) довольно объемный, поэтому на практике часто применяются приближенные формулы, основанные на некоторых упрощающих предположениях о форме корпуса судна и распределении его нагрузки. Наиболее

удачными, по мнению многих известных авто-ров, являются формула Дуайера, [9]:

$$I_{xx} = \frac{D}{12g} (B^2 + 4z_g^2), \quad (6)$$

а также формула Ю. А. Шиманского, [9]:

$$I_{xx} = \frac{D}{g} \left( B^2 \frac{C_W^2}{11,4C_B} + \frac{H^2}{12} \right), \quad (7)$$

где  $H$  – высота борта судна;

$C_W$  – коэффициент полноты ватерлинии;

$C_B$  – коэффициент общей полноты.

Формула Дуайера предпочтительнее, так как она дает результаты расчетов близкие с данными расчетов по (5) и описывает зависимость от возвышения центра тяжести судна.

Для расчета периода бортовой качки водоизмещающих кораблей, имеющих большое удлинение и малые коэффициенты общей полноты, известны данные В. А. Мореншильдт, полученные в результате испытаний система-тической серии моделей [10]. Для промысловых, буксирных и транспортных морских судов В. В. Луговским на основании испытаний двух систематических серий (всего 20 моделей), про-веденных в опытовом бассейне ЛКИ, предло-жены номограммы, по которым легко определить присоединенный момент инерции в зависимости от  $B/d$ ,  $L/B$ ,  $C_W$  и  $C_B$ , [11, 9]. Позднее С. М. Паненко провел испытания моделей с большими коэффициентами общей полноты и отношениями ширины к осадке, характерными для судов технического флота, и предложил номограмму для определения  $\lambda_{44}$  [12, 9]. Согласно этим данным, присоединенный момент инерции определяется выражением:

$$\lambda_{44} = \frac{0,314}{C_B} I_{xx} \frac{\lambda_{44}}{I_{x3}}, \quad (8)$$

где  $I_{x3}$  – момент инерции подводной части эллипсоида, имеющего те же главные разме-рения, что и данное судно (модель).

Величина  $\lambda_{44}/I_{x3}$  определяется по номограммам в зависимости от  $B/d$ ,  $L/B$ ,  $C_W$  и  $C_B$ . Пределы изменения характеристик судов, для которых получены эти номограммы, приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Пределы изменения характеристик судов

№	Тип судна	$L/B$	$B/d$	$C_B$	$C_W$
1	Транспортные суда	≈ 7,3	2,4 – 3,5	0,59 – 0,74	0,70 – 0,82
2	Промысловые и буксирные суда	3,5 – 6,5	2,4 – 3,5	0,44 – 0,56	0,70 – 0,82
3	Суда технического флота	4,5 – 6,5	3,0 – 5,6	–	0,75 – 0,90

Для широкого класса гражданских судов и судов внутреннего плавания при определении присоединенного момента инерции можно использовать также эмпирическую формулу Г. К. Авдеева, полученную путем обработки тех же результатов модельных испытаний различных судов в опытовом бассейне ЛКИ [13, 14]:

$$I_{xx} + \lambda_{44} = \frac{I_{xx}}{0,28 + \frac{1,8}{BC_W} \left(1 + \frac{1,8}{6d}\right) \sqrt{\frac{I_{xx}g}{D}}} \quad (9)$$

Для определения собственного периода бортовой качки судна необходимо знать момент инерции массы судна и присоединенный момент инерции. Их

вычисление предпочтительнее выполнить по приближенным эмпирическим методикам.

Присоединенный момент инерции  $\lambda_{44}$  в основном зависит от  $B/d$  и коэффициента полноты площади ватерлинии  $C_W$ , а так же момента инерции массы судна  $I_{xx}$ . Наиболее полно таким зависимостям для широкого класса гражданских судов и судов внутреннего плавания отвечают формула Г. К. Авдеева (9) и номограммы В.В. Луговского и С. М. Паненко.

Подставляя (9) в выражение для коэффициента  $c$  (4), получим следующую формулу:

$$c = \pi \sqrt{\frac{1+4z_g^2/B^2}{12g \left[ 0,28 + \frac{1,8}{C_W(1+0,167B/d)} \sqrt{\frac{1+4z_g^2/B^2}{12}} \right]}} \quad (12)$$

Для упрощения вычислений ее можно, с достаточной для практики степенью точности, рис. 1, привести к виду:

$$c = 0,114 + 0,012 \frac{B}{d} + 0,26 \frac{z_g}{B} + 0,195 C_W \quad (13)$$

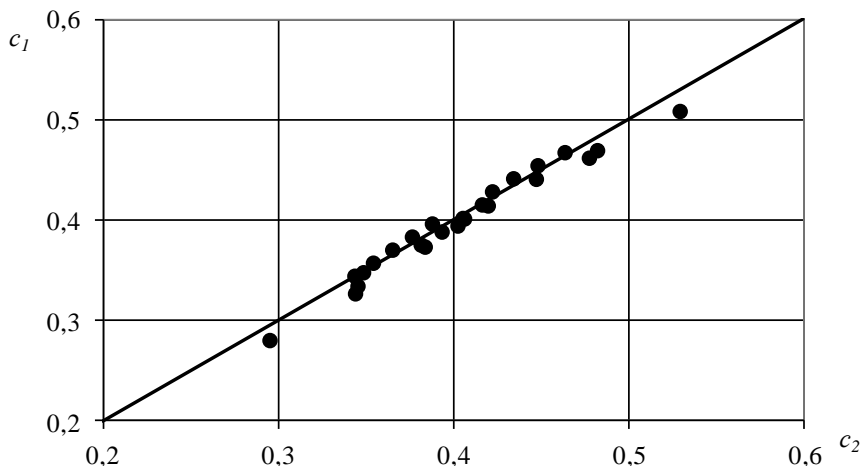


Рис. 1. Сопоставление результатов расчетов по формулам (13) и (12)

Коэффициент  $c$  можно определить и с использованием номограмм В. В. Луговского и С. М. Паненко (момент инерции массы судна определен по формуле Дуайера):

$$c = 0,289 \sqrt{\left(1 + 4 \frac{z_g^2}{B^2}\right) \left(1 + \frac{0,314 \lambda_{44}}{C_B I_{x3}}\right)} \quad (14)$$

Здесь отношение  $\lambda_{44}/I_{x3}$  определяется по номограммам в зависимости от характеристик судна  $B/d, L/B, C_W, C_B$ . На основании обработки результатов этих расчетов получена приближенная зависимость:

$$c = 0,121 + 0,10 C_W + 0,025 \frac{B}{d} + 0,35 \frac{z_g}{B} + 0,001 \frac{L}{B} \quad (15)$$

расчеты по которой дают результаты, близкие к данным, полученным непосредственно по

номограммам. Для всех значений  $B/d, L/B, C_W, C_B$  погрешность не превышает 5 – 7 %, за исключением  $C_W = 0,9$ . Для судов технического флота, где формула дает заниженные результаты, погрешность достигает 15 %.

Проверочные расчеты выполнены для 79 судов различных типов при разных вариантах загрузки (всего 289 вариантов). Разница в собственных периодах качки по предлагаемой методике и методике ИМО (рис. 2) не велика и не превышает 11% причем  $z_g/B \approx 0,33 - 0,35$  они дают практически одинаковые результаты, при  $z_g/B < 0,33$  период качки по предлагаемой методике меньше, а при  $z_g/B > 0,35$  больше периода качки по методике ИМО.

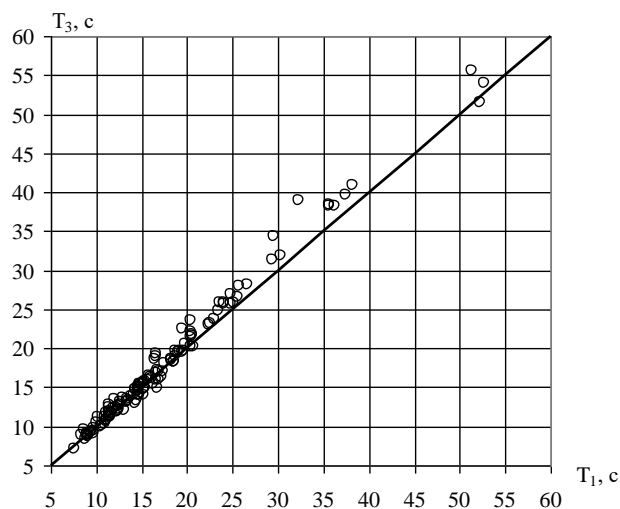


Рис. 2. Периоды качки судов неограниченного района:  $T_1$  – ИМО,  $T_3$  – предлагаемая методика.

**Заключение**

Влияние методики расчета собственных периодов на амплитуды бортовой качки для всех рассмотренных вариантов загрузки практически отсутствует

(разница в пределах одного градуса), рис. 3, 4. Очевидно, что критерий погоды при расчете периода по предлагаемой методике практически не изменится

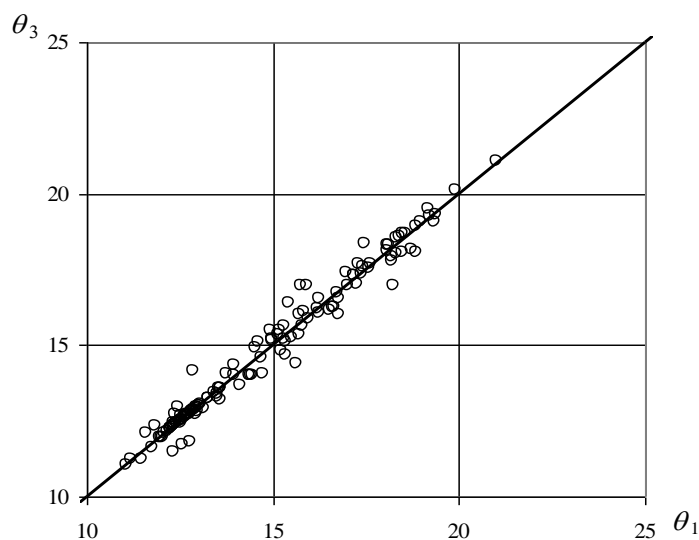


Рис. 3. Амплитуды качки судов неограниченного района.

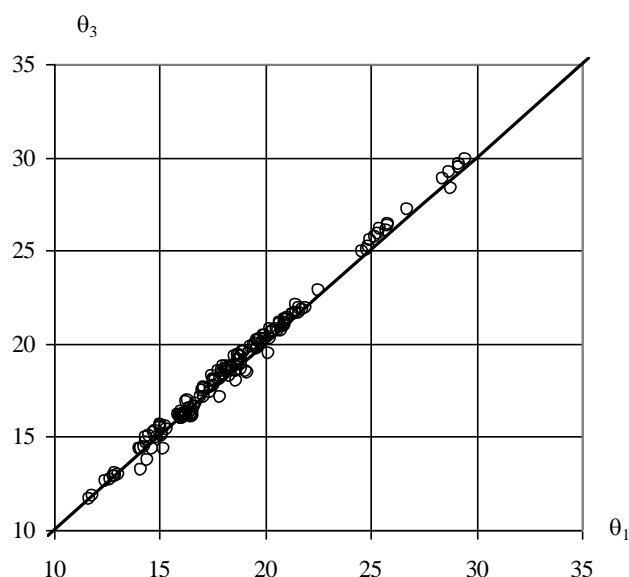


Рис. 4. Амплитуды качки судов ограниченных категорий.

**Литература**

1. Кутейников М. А. Разработка и исследование теоретических основ для назначения эксплуатационных ограничений при нормировании мореходности морских судов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – СПб.: СПбГМТУ, 2001.
2. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015. – Т. 1.
3. Code of Intact Stability for All Types of Ships. IMO Res. MSC.267(85). – 2008.
4. Исследование мореходности морских судов с избыточной остойчивостью и большим коэффициентом полноты // Заключительный отчет по теме 73-632. – Л.: ЛИВТ, 1974.
5. Семенов-Тянь-Шанский В. В., Благовещенский С. Н., Холодильн А. Н. Качка корабля. Л.: Судостроение, 1971.
6. Семенова В. Ю. Исследование и разработка программ расчета нелинейных гидродинамических сил, возникающих при колебаниях контуров корабельной формы на свободной поверхности жидкости // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – СПб.: СПбГМТУ, 1999.
7. Разработка теоретических основ по нормированию ускорений при качке судов различных типов // Отчет по теме. Балтийский инженерный центр. – 2002.

8. Р. В. Борисов, М. А. Кутейников, В. Ю. Семенова, А. А. Лузянин. О проблеме нормирования ускорений при качке. УДК 629.12.073.243.4 // Научно-технический сборник № 27. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2004.
9. Справочник по теории корабля / Под ред. Я. И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – Т.2.
10. Шмырев. А. Н., Мореншильдт В. А., Ильина С. Г. и др. Успокоители качки судов. – Л.: Транспорт, 1972.
11. Луговский В. В. Нелинейные задачи мореходности. – Л.: Судостроение, 1966.
12. Паненко С. М. Гидродинамические характеристики качки трюмных дноуглубительных судов // Научно-технический сборник СССР. Книга 2. – Л.: Транспорт, 1972.
13. Анфимов В. Н., Авдеев Г. К. Гидродинамические характеристики и расчет амплитуд боковой качки судов внутреннего плавания // Тр. ЦНИИ РФ. – Вып. XXX. – Л., 1955.
14. Луговский В. В. Качка корабля. Учебник. – СПб.: Изд. Центр СПбГМТУ, 1999.
15. Р. В. Борисов, М. А. Кутейников, А. А. Лузянин. Методика расчетной оценки собственного периода бортовой качки морских судов различных типов. УДК 629.12.001.11 // Научно-технический сборник № 27. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2004.
16. Скороходов Д. А. Навигация и управление движением судов. – СПб.: Элмор, 2002.
17. Nieuwenhuysen J. N. Experimental investigations on seasickness. Diss. Utrecht, 1958.

#### References

1. Kuteynikov M. A. Razrabotka i issledovaniye teoreticheskikh osnov dlya naznacheniya ekspluatatsionnykh ogranicheniy pri normirovaniy morekhodnosti morskikh sudov // Avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. – SPb.: SPbGMTU. 2001.
2. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. – SPb. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. 2015. – Т. 1.
3. Code of Intact Stability for All Types of Ships. IMO Res. MSC.267(85). – 2008.
4. Issledovaniye morekhodnosti morskikh sudov s izbytochnoy ostoychivostyu i bolshim koeffitsiyentom polnoty // Zaklyuchitelnyy otchet po teme 73-632. – L.: LIVT. 1974.
5. Semenov-Tyan-Shanskiy V. V., Blagoveshchenskiy S. N., Kholodilin A. N. Kachka korablya. L.: Sudostroyeniye. 1971.
6. Semenova V. Yu. Issledovaniye i razrabotka programm rascheta nelineynykh gidrodinamicheskikh sil. vznikayushchikh pri kolebaniyakh konturov korabelnoy formy na svobodnoy poverkhnosti zhidkosti // Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. – SPb.: SPbGMTU. 1999.
7. Razrabotka teoreticheskikh osnov po normirovaniyu uskoreniy pri kachke sudov razlichnykh tipov // Otchet po teme. Baltiyskiy inzhenernyy tsestr. – 2002.
8. R. V. Borisov. M. A. Kuteynikov. V. Yu. Semenova. A. A. Luzyanin. O probleme normirovaniya uskoreniy pri kachke. UDK 629.12.073.243.4 // Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik № 27. – SPb.: Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. 2004.
9. Spravochnik po teorii korablya / Pod red. Ya. I. Voytkunskogo. – L.: Sudostroyeniye. 1985. – Т.2.
10. . Shmyrev. A. N., Morenschildt V. A., Ilina S. G. i dr. Uspokoiteli kachki sudov. – L.: Transport. 1972.
11. . Lugovskiy V. V. Nelineynyye zadachi morekhodnosti. – L.: Sudostroyeniye. 1966.
12. Panenko S. M. Gidrodinamicheskiye kharakteristiki kachki tryumnykh dnouglubitelynykh sudov // Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik SSSR. Kniga 2. – L.: Transport. 1972.
13. Anfimov V. N., Avdeyev G. K. Gidrodinamicheskiye kharakteristiki i raschet amplitud bokovoy kachki sudov vnutrennego plavaniya // Tr. TsNII RF. – Yyp. KhKhKh. – L.. 1955.
14. Lugovskiy V. V. Kachka korablya. Uchebnyk. – SPb.: Izd. Tsentr SPbGMTU. 1999.
15. R. V. Borisov. M. A. Kuteynikov. A. A. Luzyanin. Metodika raschetnoy otsenki sobstvennogo perioda bortovoy kachki morskikh sudov razlichnykh tipov. UDK 629.12.001.11 // Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik № 27. – SPb.: Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva. 2004.
16. Skorokhodov D. A. Navigatsiya i upravleniye dvizheniyem sudov. – SPb.: Elmor. 2002.
17. Nieuwenhuysen J. N. Experimental investigations on seasickness. Diss. Utrecht. 1958.

УДК 004.-67+532.57+533.6.08

## ОБТЕКАНИЕ МАЛОПОГРУЖЕННОГО ПОДВОДНОГО КРЫЛА В ДИАПАЗОНЕ КРИТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ ЧИСЛА ФРУДА

Кирилл Всеволодович Рождественский

д.т.н., профессор

проректор по международному сотрудничеству

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3

e-mail: kvrxmas@yahoo.com

### Аннотация

В статье обсуждается приближенное решение задачи о подводном профиле при малых относительных погружениях  $h$  и малых значениях порядка  $O(\sqrt{h})$  чисел Фруда по хорде  $Fr$ , соответствующих значениям порядка  $O(1)$  числа Фруда по глубине  $Fr_h = Fr / \sqrt{h}$ . Применяется математическая технология метода сращиваемых асимптотических разложений с построением асимптотических разложений решения в зонах потока с различными характерными масштабами с последующей аддитивной композицией решения. Обнаружено, что в главном приближении доминирует течение в узком канале между крылом и свободной поверхностью, управляемое уравнением неразрывности и граничными (кинематическими и динамическими) условиями. В определенном диапазоне чисел Фруда математическая модель отражает основные черты кризиса течения, наблюдавшегося ранее в экспериментах. Для малопогруженного подводного профиля указанный кризис проявляется в резком изменении гидродинамических характеристик, в частности, коэффициента подъемной силы, при числах Фруда по глубине, близких к единице. Представлены некоторые аналитические и численные результаты, соответствующие предельной математической модели критического обтекания малопогруженного профиля в случае стационарного и нестационарного обтекания. Показано, как распространить подход на пространственный случай.

**Ключевые слова:** малопогруженное подводное крыло, кризис мелкой воды, вихреволновой резонанс

## FLOW PAST A HYDROFOIL AT SHALLOW SUBMERGENCE IN THE RANGE OF CRITICAL FROUDE NUMBERS

Kirill V. Rozhdestvenskiy

DScTech, Professor

Vice-Principal for International Cooperation

St. Petersburg State Marine Technical University

190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3

e-mail: kvrxmas@yahoo.com

### Abstract

The article discusses an approximate solution of the problem of submerged profile for small relative immersions.  $h$  and small order values of  $O(\sqrt{h})$  Froude numbers by chord  $Fr$  corresponding to the order values of  $O(1)$  Froude numbers in depth  $Fr_h = Fr / \sqrt{h}$ . The mathematical technology of the method of matched asymptotic expansions is applied with building up asymptotic expansions of the solution in flow zones with different characteristic scales with the subsequent additive composition of the solution. It was found that, in the main approximation, the flow in the narrow channel between the hydrofoil and the free surface dominates, controlled by the continuity equation and boundary (kinematic and dynamic) conditions. In a certain range of Froude numbers, the mathematical model reflects the main features of the current crisis observed earlier in the experiments. For a shallow submerged foil, this crisis manifests itself in a sharp change in hydrodynamic characteristics, in particular, the lift coefficient, with Froude numbers in depth close to unity. Some analytical and numerical results are presented, which correspond to the limiting mathematical model of the critical flow around a shallow submerged foil in the case of stationary and non-stationary flow. It is shown how to extend the approach to the spatial case.

**Keywords:** shallow submerged foil, shallow water crisis, eddy resonance

Опубликованные экспериментальные и расчетные данные показывают, что при движении малопогруженного подводного профиля при малых значениях числа Фруда может иметь место явление, аналогичное так называемому кризису мелкой воды, [1]. Известно, что при движении судна на мелкой воде

при скоростях близких к значению  $\sqrt{gH}$  (где  $g$  – ускорение свободного падения,  $H$  – глубина воды) волновое сопротивление резко увеличивается, затем, при дальнейшем увеличении скорости судна падает, [2]. Как отмечено в [1], для подводного крыла при малых погружениях аналогичные

кризисные изменения претерпевает коэффициент подводной силы. Аналогия между упомянутыми выше кризисными явлениями вполне очевидна, поскольку в случае малых погружений обращенная к свободной поверхности верхняя (засасывающая) сторона крыла служит дном соответствующего канала малой глубины. В этой работе строится упрощенная математическая модель течения, в которой с применением метода сращиваемых асимптотических разложений (МСАР), [3]. При этом конструктивно используется малость относительного расстояния между профилем и свободной поверхностью.

2. Постановка двумерной нелинейной стационарной задачи

Пусть тонкий слегка искривленный подводный крыловой профиль движется вблизи свободной поверхности идеальной несжимаемой тяжелой жидкости.



Рис. 1 Подводный профиль вблизи свободной поверхности

Соответствующая задача о нахождении потенциала скорости относительного движения жидкости  $\varphi$  подчинена:

- Уравнению Лапласа,

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

- Условие непротекания на крыле и на (заранее неизвестной) свободной поверхности

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial z} \frac{dy_{s,w}}{dx} \quad \text{на} \quad y = y_s(x) \pm 0 \quad \text{и} \quad y = y_w(x) - 0. \quad (2)$$

- Динамическому условию на свободной поверхности

$$\bar{p} = \frac{2(p - p_0)}{\rho U_0^2} = 1 - v^2 - \frac{2}{Fr^2} (y_w - h_\infty) = 0 \quad (3)$$

где  $\bar{p}$  - коэффициент давления,  $v^2 = (\partial \varphi / \partial x)^2 + (\partial \varphi / \partial y)^2$  - скорость относительного движения жидкости,  $Fr = U_0 / \sqrt{gc}$  - число Фруда по

хорде, а также условию затухания возмущений впереди на бесконечности и на глубине

$$|\nabla \varphi| \rightarrow U_0 \quad \text{при} \quad x \text{ и/или} \quad y \rightarrow -\infty \quad (4)$$

Кроме того, необходимо удовлетворить условию Жуковского-Чаплыгина, которое в данном случае понимается как требование непрерывности давления при переходе через заднюю кромку.

Для малопогруженного профиля можно предположить, что  $h_\infty = h \rightarrow 0$ . Кроме того, ограничимся рассмотрением значениями числа Фруда по хорде  $Fr = O(\sqrt{h})$ , что соответствует числам Фруда по глубине  $Fr_h = O(1)$ . Допустим, что  $y_{s,w} = O(h)$  и  $\partial y_{s,w} / \partial x = O(h)$ , так что и контур средней линии профиля и свободная поверхность считаются слабоискривленными.

Обращаясь к методу сращиваемых асимптотических разложений (МСАР) разобьем поле течения на три характерные зоны:  $D_u$  - течение в узком области между профилем и свободной границей (поток в канале),  $D_l$  - течение под профилем и частью свободной поверхности вне профиля (поток под профилем),  $D_e$  - локальные течения в окрестности передней и задней кромок (кромочные потоки). Отметим, что, в определенной степени, алгоритм решения рассматриваемой задачи сходен с алгоритмом решения задачи о крыле, движущемся над экраном на предельно малых расстояниях, примененном в монографии автора [4].

3. Алгоритм решения двумерной стационарной задачи посредством МСАР.

Последующий анализ показывает, что изменения ординат профиля порядка  $O(h)$ , вызывающие возмущения того же порядка в зоне нижнего потока, могут привести к возмущениям порядка  $O(1)$  в потоке между профилем и свободной поверхностью. Поэтому, рассматриваемая здесь теория может рассматриваться как нелинейная по возмущениям.

1. Асимптотика течения между профилем и свободной поверхностью

В зоне  $D_u$ , где  $x = O(1), y = O(h)$ , введем растянутую вертикальную координату  $\bar{y} = y/h$  и ищем асимптотическое разложение решения в виде  $\varphi'' = \varphi_1'' + h^2 \varphi_2''$ ,  $(\varphi_1'', \varphi_2'') = O(1)$ . (5) Подстановка в уравнение (1) при  $(x, \bar{y}) = O(1), h \rightarrow 0$  приводит к следующему уравнению для функции  $\varphi_1''(x)$

$$\frac{d}{dx} \left( \bar{h}^* \frac{d\varphi_1''}{dx} \right) = 0, \quad x \in (0,1). \quad (6)$$

Уравнение (6) аналогично одномерному уравнению мелкой воды и выражает закон сохранения массы в



сильно сжато в вертикальном направлении течения между профилем и свободной поверхностью.

Заметим, что в данном приближении функция  $\varphi_1^u$  зависит только от  $x$ .

Поскольку уравнение (6) содержит две неизвестные функции  $d\varphi_1^u/dx$  и  $\bar{y}_w$ , необходимо рассмотреть динамическое условие на свободной поверхности. С учетом (5) перепишем (3) в виде

$$\bar{y}_w - 1 = \frac{Fr^2}{2h}(1 - v^2) = \frac{1}{2} Fr_h^2(1 - v^2) = \frac{1}{2} Fr_h^2 \left[ 1 - \left( \frac{d\varphi_1^u}{dx} \right)^2 - \frac{1}{h^2} \left( \frac{d\varphi_1^u}{dy} \right)^2 \right] \approx \quad (7)$$

$$\frac{1}{2} Fr_h^2 \left[ 1 - \left( \frac{d\varphi_1^u}{dx} \right)^2 \right].$$

Обозначая  $v_1 = d\varphi_1^u/dx$ , перепишем (7) и (8) в виде системы уравнений

$$\frac{d}{dx}(\bar{h}^* v_1) = 0, \quad \bar{h}^* = \bar{y}_w - \bar{y}_s, \quad (8)$$

$$\bar{y}_w - 1 = \frac{1}{2} Fr_h^2(1 - v_1^2). \quad (9)$$

Интегрирование (9) дает

$$\bar{h}^* v_1 = (\bar{y}_w - \bar{y}_s) v_1 = -q_0, \quad (10)$$

где  $q_0$  есть расход жидкости в канале между профилем и свободной границей, определяемый посредством асимптотического сращивания с течением под профилем через кромочные потоки.

Исключая  $\bar{y}_w$  из (10) с помощью (9), приходим к следующему уравнению относительно скорости течения в канале

$$\frac{1}{2} Fr_h^2 v_1^3 + \left( \bar{y}_s - 1 - \frac{1}{2} Fr_h^2 \right) v_1 - q_0 = 0. \quad (11)$$

Решение кубического уравнения (11) позволяет найти ординаты свободной поверхности  $\bar{y}_w$  из уравнения (10). Давление (динамическое) на верхней стороне профиля можно выразить явным образом через деформацию  $\bar{\eta}_w = \bar{y}_w - 1$  свободной поверхности по отношению к ее невозмущенному горизонтальному положению. Соответствующий коэффициент давления равен

$$\bar{p}^u = \frac{2}{Fr_h^2}(\bar{y}_w - 1) = \frac{2}{Fr_h^2} \bar{\eta}_w = 1 - v_1^2 \quad (12)$$

### 3.2. Локальные задачи для потоков вблизи кромок

В окрестности кромок  $D_e$  соответствующие кромочные координаты  $x_e$  и  $y_e$  имеют порядок  $O(h)$ . Введем растянутые координаты

$\bar{x}_e = x_e/h_e$ ,  $\bar{y}_e = y_e/h_e$ , где  $h_e = h_e^*$  есть расстояние от вершины кромки до свободной поверхности. В связи с предположением о малой искривленности профиля и свободной поверхности точки этих контуров в растянутой области  $\bar{D}_e$  расположены от соответствующих горизонтальных линий  $\bar{y} = 0$  и  $\bar{y} = 1$  на расстояниях порядка  $O(h)$ . Поэтому, условие непротекания может быть выполнено на этих линиях, и локальная задача может рассматриваться как линейная. Опуская для краткости все промежуточные шаги, запишем следующее интегральное уравнение относительно кромочного распределения вихревой интенсивности  $\gamma_e(\bar{x}_e)$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^0 \gamma_e(\xi) \left\{ \frac{1}{x - \xi} + \frac{\bar{x}_e - \xi}{(\bar{x}_e - \xi)^2 + 4} + \frac{2 \cos \frac{t - \bar{x}_e}{Fr_h^2} + (t - \xi) \sin \left( \frac{t - \bar{x}_e}{Fr_h^2} \right)}{(t - \xi)^2 + 4} \right\} dt \quad (13)$$

$$= h^2 d_e$$

Уравнение (13) должно решаться на полубесконечном разрезе с учетом правильного поведения в окрестности вершины соответствующей кромки (особенность типа квадратного корня на передней кромке и нуль типа корень квадратный вблизи задней кромки). Константа  $d_e$  определяется посредством сращивания.

### 2. Асимптотическое описание нижнего потока

В зоне  $D_l$  (в нижней полуплоскости ( $y \leq 0$ ) при  $(x, y) = O(1)$  и  $h \rightarrow 0$ ) приходим к соответствующей задаче Неймана, решение которой строится непосредственно. С асимптотической точностью порядка  $O(h)$  потенциал течения  $\varphi_l$  на нижней стороне профиля можно записать в виде

$$\varphi_l = \frac{Q_0}{2\pi} \ln(x - 1) + \frac{1}{2\pi} \int_0^1 Q(\xi) \ln(x - \xi) d\xi, \quad (14)$$

где, в соответствии с теорией тонкого тела  $Q(x) = -2dy_s/dx = -2hd\bar{y}_s/dx$ . Мощность точечного источника в точ  $x = 1$ , моделирующего перетекание жидкости с нижней стороны на верхнюю, нетрудно найти из соображений сохранения массы в виде

$$Q_0 = -\int_0^1 Q(\xi) d\xi = 2h[\bar{y}_s(1) - \bar{y}_s(0)] = 2h\bar{\alpha}, \quad (15)$$

где  $\bar{\alpha} = \alpha/h$ ,  $\alpha$  - угол атаки в радианах.

**3. Некоторые результаты для стационарного нелинейного течения при исчезающе малых относительных погружениях**

**3.1. Нелинейный случай (умеренные возмущения)**

При исчезающе малых  $h$  предельная модель течения описывается уравнением течения в в канале (11), вклад которого имеет порядок  $O(1)$ .

Форма и число вещественных решений кубического уравнения (11) зависит от знака дискриминанта  $D$

$$D = \frac{1}{Fr^4} \left[ q_0^2 + \frac{8}{27Fr^2} \left( \bar{y}_s - 1 - \frac{1}{2} Fr_h^2 \right)^3 \right]. \quad (16)$$

При  $D < 0$  и  $q_0 = 1$  уравнение (11) имеет три различных вещественных корня. Для  $D = 0$  имеется два вещественных корня, положительным значениям дискриминанта  $D > 0$  соответствует одно вещественное решение. С физической точки зрения изменение знака  $D$  отражает изменение режима течения (докритический, транскритический и закритический). Соответствующие выражения для распределения скорости в канале между профилем и свободной поверхностью найдены в виде

При  $D \leq 0$

$$v_1(x) = -\frac{2}{Fr_h} \sqrt{\frac{2}{3} \left| \bar{y}_s - 1 - \frac{1}{2} Fr_h^2 \right|} \times \cos \left[ \frac{\pi}{3} \pm \frac{1}{3} \arccos \frac{q_0 Fr_h}{\sqrt{8 \left| \bar{y}_s - 1 - Fr_h^2 / 2 \right|^3 / 27}} \right], \quad (17)$$

При  $D > 0$

$$v_1(x) = \frac{2}{Fr_h} \sqrt{\frac{2}{3} \left| \bar{y}_s - 1 - \frac{1}{2} Fr_h^2 \right|} \times \cosh \left[ \frac{1}{3} \operatorname{arccosh} \frac{q_0 Fr_h}{\sqrt{8 \left| \bar{y}_s - 1 - Fr_h^2 / 2 \right|^3 / 27}} \right]. \quad (18)$$

Верхний знак в (18) соответствует  $Fr_h < 1$ , нижний знак используется при  $Fr_h > 1$ .

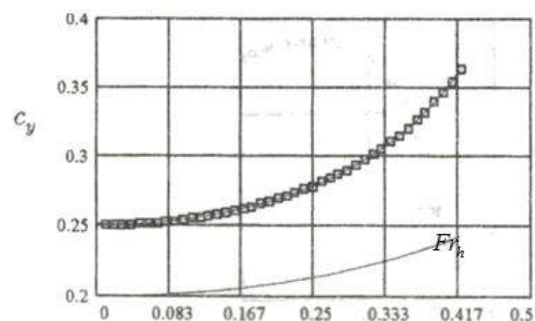
Коэффициент подъемной силы найден посредством интегрирования скачка коэффициента давления по длине профиля с использованием формулы (12).

Предположим, что в докритическом и транскритическом случаях справедливо условие (Жуковского) непрерывности давления на задней кромке. Тогда, с асимптотической погрешностью

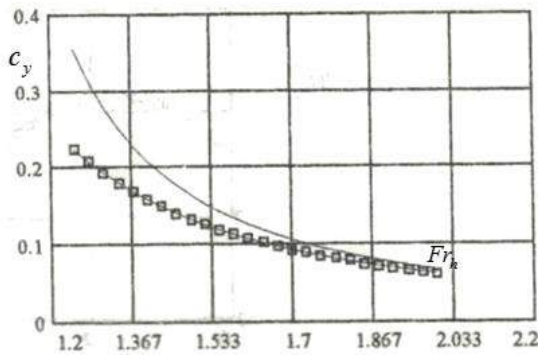
порядка  $O(h)$  возмущенное давление на задней кромке можно приравнять к нулю, что соответствует значению расхода  $q_0 = 1$ . Используя это значение  $q_0$  и уравнение  $D = 0$ , нетрудно найти критические значения чисел Фруда  $Fr_h^{crit} < 1$  в нелинейном случае из следующего соотношения

$$y_s^{max} = h \left( 1 + \frac{1}{2} Fr_h^{2/crit} - \frac{3}{2} Fr_h^{2/3/crit} \right). \quad (19)$$

В диапазоне чисел Фруда  $Fr_{hcrit} \leq Fr_h \leq 1$  данная математическая модель обнаруживает конечные скачки давления, а также ординат свободной поверхности при определенных значениях абсциссы  $0 \leq x^* \leq 1$ . Аналогичными с математической точки зрения, хотя и отличающимися по своей физической природе являются скачки в ударных волнах, сопровождающие транскритические явления при обтекании аэропрофиля сжимаемым потоком. Наблюдаемые в исследуемом случае скачки ординат свободной поверхности соответствуют (в математическом смысле) скачкам плотности в сжимаемом потоке. Оставляя более подробное исследование случая транскритического течения на будущее, уместно заметить, что ударная волна при увеличении числа Фруда движется к задней кромке, достигая этой кромки при  $Fr_h = 1$ . При дальнейшем увеличении числа Фруда устанавливается закритический режим обтекания, при котором выполнить условие Жуковского уже не удастся. Здесь, в закритическом случае, мы применяем условие обнуления возмущенного давления на входе в канал между профилем и свободной поверхностью (при  $x = 1$ ), что приводит к значению  $q_0 = 1 - \bar{\alpha}$ , где  $\bar{\alpha} = \alpha/h$  представляет собой растянутый угол атаки в радианах. На Рис. 2а и Рис. 2б иллюстрируется поведение коэффициента подъемной силы профиля в зависимости от числа Фруда, предсказываемое данной математической моделью при  $\bar{\alpha} = 0.1$ .



**Рис. 2а** Коэффициент подъемной силы подводного профиля при докритических значениях числа Фруда по погружению ( $Fr_h < 1$ )



**Рис. 2b** Коэффициент подъемной силы подводного профиля при закритических значениях числа Фруда по погружению ( $Fr_h > 1$ )

3.3. Линеаризованный стационарный двумерный случай

В линеаризованном варианте  $y_s(x) \ll h$ ,  $y'_s(x) = O(y_s)$  математическая модель еще больше упрощается, и коэффициент подъемной силы может быть получен в следующем аналитическом виде

$$c_y = \frac{1}{|1 - Fr_h^2|} \left[ \bar{\alpha} \pm 2\bar{\delta}_c \int_0^1 f(\xi) d\xi \right], \quad (20)$$

где верхний знак соответствует докритическому случаю ( $Fr_h < 1$ ), а нижний знак соответствует закритическому случаю ( $Fr_h > 1$ );  $f(x)$  есть функция порядка  $O(1)$ , описывающая среднюю линию профиля ( $f(0) = f(1) = 0$ );  $\bar{\delta}_c = \delta_c / h$ , а  $\delta_c$  представляет собой относительную кривизну средней линии профиля. Из рассмотрения (20) следует, что **переход от докритического режима к закритическому происходит по-разному для профиля-пластины с углом атаки и для профиля-дужки без угла атаки**. Этот вывод подтверждается экспериментальными данными [1].

3.2. Линеаризованный нестационарный двумерный случай

В двумерном нестационарном случае аналогичный подход приводит к следующей предельной математической модели потока между профилем и свободной поверхностью, сформулированной относительно потенциала возмущенных скоростей

$$\tilde{\varphi}(x, t) = \varphi_1^u(x, t) + x$$

$$(1 - Fr_h^2) \frac{\partial^2 \tilde{\varphi}}{\partial x^2} + 2Fr_h^2 \frac{\partial^2 \tilde{\varphi}}{\partial x \partial t} - Fr_h^2 \frac{\partial^2 \tilde{\varphi}}{\partial t^2} =$$

$$\frac{\partial \bar{y}_s}{\partial t} - \frac{\partial \bar{y}_s}{\partial x}, \quad (21)$$

$$\tilde{\varphi}(1, t) = 0; \tilde{p}(0, t) = 0 \text{ при } Fr_h < 1, \text{ или}$$

$$\tilde{p}(1, t) = 0 \text{ при } Fr_h > 1. \quad (22)$$

Заметим, что при замене чила Фруда  $Fr_h$  на число Маха  $M$  задача становится идентичной линеаризованной задаче нестационарного движения тонкого аэропрофиля под твердой стенкой в сжимаемой жидкости, [4, 5].

Для случая гармонических возмущений, решение сформулированной выше задачи может быть получено в замкнутом виде. Например, для подводного профиля, совершающего вертикальные колебания с амплитудой  $h_m$  в непосредственной близости от свободной поверхности  $(\bar{y}_s(x, t) = i\bar{h}_m e^{ikt}, \bar{h}_m = h_m / h,$

$\tilde{\varphi}(x, t) = \tilde{\Phi}(x) e^{ikt}$ ) задача принимает вид

$$(1 - Fr_h^2) \frac{d^2 \tilde{\Phi}}{dx^2} + 2ikFr_h^2 \frac{d\tilde{\Phi}}{dx} + k^2 Fr_h^2 \tilde{\Phi} = -k\bar{h}_m, \quad (23)$$

$$\tilde{\Phi}(1) = 0, \quad (24)$$

$$ik\tilde{\Phi} - \frac{d\tilde{\Phi}}{dx} = 0 \text{ при } x = 0 \text{ и } Fr_h > 1. \quad (25)$$

$$ik\tilde{\Phi} - \frac{d\tilde{\Phi}}{dx} = 0 \text{ при } x = 1 \text{ и } Fr_h < 1, \quad (26)$$

Коэффициент подъемной силы для этого случая получен в виде

$$c_y = \text{Re}(\hat{c}_y e^{ikt}), \quad (27)$$

$$\hat{c}_y = 2\delta \left\{ ik \left[ 1 + \frac{\beta_2(ike^{\beta_2} + \beta_2 - ik)(e^{\beta_1} - 1) - (ike^{\beta_1} + \beta_1 - ik)(e^{\beta_2} - 1)\beta_1}{\beta_1\beta_2[(\beta_1 - ik)e^{\beta_2} - (\beta_2 - ik)e^{\beta_1}]} \right] + 1 + \frac{ik(e^{\beta_2} - e^{\beta_1}) + \beta_2 - \beta_1}{(\beta_1 - ik)e^{\beta_2} - (\beta_2 - ik)e^{\beta_1}} \right\}, \quad (28)$$

Где  $k$  есть число Струхала по хорде,

$$\delta = -\bar{h}_m / kFr_h^2, \beta_{1,2} = i(-\mu \pm \sqrt{\mu(k + \mu)}),$$

$$\mu = kFr_h^2 / (1 - Fr_h^2), i = \sqrt{-1}. \text{ Производные}$$

коэффициента подъемной силы по кинематическим параметрам  $\dot{h}, \ddot{h}$  можно найти по следующим формулам

$$hc_y^{\dot{h}} = -\text{Re} \left( \frac{\hat{c}_y}{h_m k} \right), \quad hc_y^{\ddot{h}} = \text{Im} \left( \frac{\hat{c}_y}{h_m k^2} \right). \quad (29)$$

Некоторые результаты расчетов гидродинамических характеристик  $hc_y^{\dot{h}}$  и  $hc_y^{\ddot{h}}$  в зависимости от числа

Струхаля для значения числа Фруда  $Fr_h = 0.5$  представлены на Рис. 3 и 4.

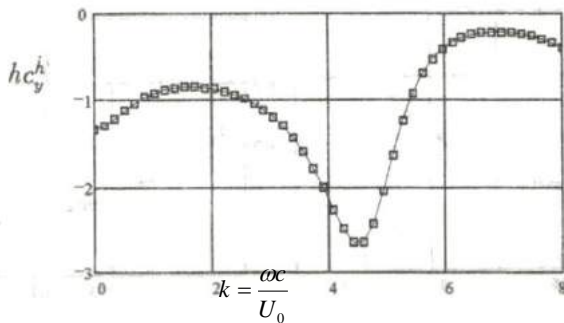


Рис. 3 Вертикальные колебания подводного профиля вблизи свободной поверхности. Производная нестационарного коэффициента подъемной силы  $hc_y^h$  в зависимости от числа Струхаля,  $Fr_h = 0.5$ .

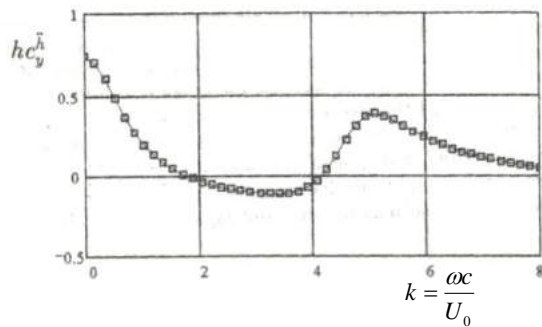


Рис. 4 Вертикальные колебания подводного профиля вблизи свободной поверхности. Производная нестационарного коэффициента подъемной силы  $hc_y^h$  в зависимости от числа Струхаля,  $Fr_h = 0.5$ .

3.4. Подводное крыло-пластина при малых погружениях

В линейном стационарном случае, которым мы здесь ограничимся при рассмотрении пространственного обтекания, предельная математическая модель, соответствующая исчезающе малым относительным расстояниям между крылом-пластиной и свободной поверхностью описывается следующими соотношениями

$$(1 - Fr_h^2) \frac{\partial^2 \phi_1^u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_1^u}{\partial z^2} = -\frac{\partial \bar{y}_s}{\partial x}, \quad (30)$$

$$\phi_1^u = 0 \text{ на передней и боковых кромках,} \quad (31)$$

$$\frac{\partial \phi_1^u}{\partial x} = 0 \text{ на задней кромке при } Fr_h < 1, \quad (32)$$

$$\frac{\partial \phi_1^u}{\partial x} = 0 \text{ на передней кромке при } Fr_h > 1, \quad (33)$$

Для крыла прямоугольной формы в плане с удлинением  $\lambda$  и углом атаки  $\alpha$  решение задачи (30)-(33) можно получить в аналитическом виде. В частности, выражение для производной по углу атаки коэффициента подъемной силы получено в виде

При  $Fr_h < 1$ ,

$$c_y^\alpha = \frac{16}{h\lambda_1^2(1 - Fr_h^2)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\tanh q_1 \tanh(q_1/2)}{q_1^4}, \quad (34)$$

При  $Fr_h > 1$

$$c_y^\alpha = \frac{16}{h\lambda_1^2(Fr_h^2 - 1)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin^2(q_1/2)}{q_1^4}, \quad (35)$$

где  $\lambda_1 = \lambda \sqrt{|1 - Fr_h^2|}$ ,  $q_1 = \pi(2n + 1) / \lambda_1$ .

Значения  $hc_y^\alpha$  построены в зависимости от числа Фруда по погружению  $Fr_h$  для различных значений  $\lambda_1$  на Рис. 5.

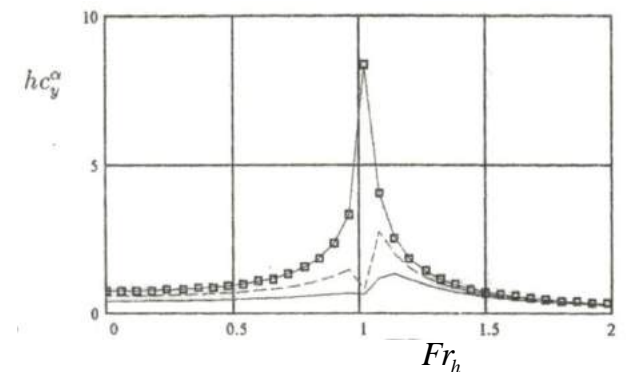


Рис. 5 Производная коэффициента подъемной силы по углу атаки для прямоугольного крыла-пластины в функции от числа Фруда по погружению при различных удлинениях крыла. Сплошная линия  $\lambda = 2$ , пунктирная линия  $\lambda = 3$ , точки (квадратики)  $\lambda = 5$

**Заключение**

В данной работе сделана попытка построить правдоподобное математическое описание достаточно сложной картины обтекания подводного профиля в непосредственной близости от свободной поверхности тяжелой идеальной жидкости, в предположении о малых и умеренных возмущениях. Для случая малых возмущений математическая модель допускает расширение на случай нестационарного и пространственного обтекания. Модель подтверждает наличие критических режимов обтекания вблизи значений чисел Фруда по погружению порядка единицы, а также различие вида скачков подъемной силы для крыла-пластины и крыла-дужки.

В связи с ограниченностью объема статьи здесь опущены подробные математические выкладки, связанные с реализацией метода сращиваемых асимптотических разложений и вывода конечных формул.

**Литература**

1. Басин М.А., Лордкипанидзе А.Н., Ткач А.Я., «Явление вихреволнового резонанса в задачах обтекания подводного профиля вблизи свободной поверхности тяжелой жидкости».- В Сб. НТО им. Акад. А.Н. Крылова, 1985, вып. 414, с. 115-127.
2. Справочник по теории корабля (в трех томах) под редакцией Я.И. Войткунского, Ленинград, Издательство Судостроение, Том первый: гидромеханика, сопротивление движению судна, судовые движители, с. 289-290.
3. Рождественский К.В., «Метод сращиваемых асимптотических разложений в гидродинамике крыла», *Ленинград, Издательство «Судостроение», 1979, 208 с.*
4. Rozhdestvensky K.V., «Aerodynamics of a Lifting System in Extreme Ground Effect», Springer, Heidelberg-New York- London-Paris-Tokyo, Series: Physics and Astronomy, 2000, p.p. 352.
5. Рождественский К.В. «Асимптотическая теория крыла, движущегося на малых расстояниях от твердой стенки», Известия АН СССР, Механика жидкости и газа, 1967, № 6, с.с. 115-124.

**References**

1. Basin M.A., Lordkipanidze A.N., Tkach A.Ya. «A phenomenon of vortex-wave resonance in the flow problem for a hydrofoil in proximity of fluid under gravity».- Sbornik NTO imeni akad. A.N. Krylova, 1985, vyp. 414, s.s. 115-127.
2. Reference Book on Theory of Ships (in three volumes).- Red. Ya. I. Voitkunskiy, Izdatelstvo Sudostroenie, 1985, Tom 1, s.s. 289-290.
3. Rozhdestvenskii K.V., «Metod sraschivaemyh asimptoticheskikh razlozhenii v gidrodinamike kryla», *Leningrad, Izdatel'stvo «Sudostroenie», 1979, 208 s.*
4. Rozhdestvensky K.V., «Aerodynamics of a Lifting System in Extreme Ground Effect», Springer, Heidelberg-New York- London-Paris-Tokyo, Series: Physics and Astronomy, 2000, p.p. 352.
5. Rozhdestvensky K.V., «Asimptoticheskaia teoriya krila, dvizhushchegosia na malykh rasstoyaniyakh ot tverdoi stenki», *Izvestia AN SSSR, Mekhanika zhidkosti i gaza, 1977, No. 6, s.s. 115-124.*

УДК 629.12: 539.433

## КВАЗИОДНОМЕРНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ СУДОВОГО КОРПУСА НА РАННИХ СТАДИЯХ ЕГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**Армен Левонович Мелконян**

кандидат технических наук, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
тел. (911) 911-64-25; e-mail: mel1950@mail.ru

**Дмитрий Александрович Николаев**

кандидат технических наук  
e-mail: D.Nikolaevl@d-nik.de

### Аннотация

В статье обосновывается рекомендация о непрерывном расчетном контроле параметров общей вибрации корпуса судна на всех стадиях его проектирования с целью оперативного принятия мер по снижению уровня вибрации судового корпуса. Неполнота знаний исходных данных на ранних стадиях проектирования диктует необходимость использования в расчетах достаточно простых моделей, характеристики которых должны уточняться по мере перехода от одного этапа проектирования к следующему. Сравнительная простота моделей должна позволять оперативно оценивать влияние на общую вибрацию корпуса принимаемых проектантом решений и выдавать ему соответствующие рекомендации.

В статье для корпуса судна предлагается квазиодномерная модель, позволяющая исследовать его связанные изгибно-крутильно-продольные вынужденные установившиеся колебания, возникающие вследствие действия задаваемых периодических нагрузок. Приводится подход, позволяющий учитывать влияние на вибрацию судового корпуса установки на нем конструктивных модулей с малым районом протяженности (такая установка приводит их совместной вибрации).

В статье предлагается при исследовании установившихся колебаний перейти к квазистатической модели с комплексными характеристиками параметров (инерционности, жесткости, внешней нагрузки). Для этого используются квазистатическая аналогия и метод комплексных параметров.

В статье для расчета параметров напряженно-деформированного состояния квазистатической модели предложен алгоритм, основанный на дискретном варианте метода парциальных откликов. Указана расчетная программа, в которой этот подход реализован.

**Ключевые слова:** вибрация, квазиодномерная модель, связанные колебания, совместные колебания, парциальные отклики

## QUASI-ONE-DIMENSIONAL MODELS FOR ANALYZING VIBRATION PARAMETERS OF A SHIP HULL AT THE EARLY STAGES OF ITS DESIGN

**Armen L. Melkonyan**

PhD in Engineering Science, Professor of the Department of Theoretical Mechanics and Resistance of Materials  
of St. Petersburg State Marine Technical University

190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
tel: +7 (911) 911-64-25, e-mail: mel1950@mail.ru

**Dmitry A. Nikolaev**

PhD in Engineering Science  
e-mail: D.Nikolaevl@d-nik.de

### Abstract

The article substantiates the recommendation on continuous computational monitoring the general vibration parameters of a ship hull at all stages of its design engineering with the aim of quick actions on reducing vibration level of the ship hull. The incompleteness of input data at the early stages of design, dictates the need to use fairly simple models in calculations, the characteristics of which should be defined more accurately while proceeding from one design stage to the next one. The comparative simplicity of models should allow prompt assessment of impact on general vibration of the hull of decisions taken by a designer and giving him out appropriate recommendations.

The article proposes a quasi-one-dimensional model for a ship hull, which allows analyzing its coupled flexure-torsion-longitudinal sustained forced vibrations generated due to the action of specified periodic loads. An approach presented, allows taking into account the impact on a ship hull vibration of the installation of structure modules with a small range of extent, thereon (such installation results in their joint vibration).

The article proposes switching to a quasistatic model with integrated characteristics of parameters (inertance, stiffness, external load) while studying sustained vibrations. A quasistatic analogy and the method of integrated parameters are used to this end.

An algorithm based on the discrete variant of the partial response method is proposed in the article to calculate the parameters of the stress-strain state of the quasistatic model. Computational software for implementation of this approach is specified.

**Keywords:** vibration, quasi-one-dimensional model, coupled vibrations, joint vibrations, partial responses

### Введение

Развитие судостроения, а так же различных объектов морской инфраструктуры, предназначенных для освоения океана, неразрывно связано со стремлением максимально снизить относительный вес конструкций. Одновременно явно просматривается тенденция возрастания размеров последних, а так же использование при их создании новых конструкционных материалов. Все это приводит к снижению собственных частот создаваемых объектов в целом, а так же ряда их отдельных элементов. В результате резко возрастает вероятность возникновения различного рода резонансных явлений и охвата ими все более высоких тонов колебаний. Одновременно увеличивается и степень связанности вибраций различного вида (поперечная, крутильная, продольная). С другой стороны, увеличение мощности основных и вспомогательных механизмов обуславливает тенденцию роста амплитуд возмущающих усилий. Наконец, ужесточаются требования к нормам допустимой вибрации.

Отсюда возникает настоящая необходимость непрерывного совершенствования методов анализа и расчета вибрации рассматриваемого класса конструкций, поскольку существующие методы уже не охватывают всех ее особенностей в новых, существенно усложняющихся условиях. Особенно это касается корпусов кораблей и устройств нового типа. В связи с бурным развитием в 60-х прошлого века вычислительной техники стало возможным построение моделей судового корпуса в виде совокупности очень большого числа сопряженных между собой элементов, каждый из которых, в свою очередь, достаточно корректно моделировал участки балок или пластин, формирующих реальный судовый корпус. Запись уравнений состояния элементов такой модели, условий их сопряжения и методика расчета параметров напряженно-деформированного состояния такой модели составляют основу метода конечных элементов (МКЭ). Эти обстоятельства и продиктовали методику борьбы с вибрацией, остающейся практически неизменной и по настоящее время: на самых первых стадиях проектирования корпус судна моделируется эквивалентным брусом (непризматической балкой), продольные, изгибные и крутильные колебания которой независимы; по окончании проектирования и создания комплекта рабочих чертежей готовятся исходные данные для расчета параметров вибрации судна как многомерного объекта методом конечных элементов. После выполнения расчетов проектанты получают сведения об общей (вибрация корпуса) и местной вибрации судна. Очевидно, что процесс подготовки исходных данных для такого расчета, его выполнение и анализ получаемых результатов требуют значительных трудовых и временных

затрат. Как правило, в это время идет заказ материалов для постройки судна, а подчас, и его закладка. Заметим, что если борьба с местной вибрацией может быть осуществлена и на финальной стадии проекта или постройки судна (установка подкреплений, амортизация постов и рабочих мест), то борьба с общей вибрацией корпуса на этом этапе оказывается практически невозможной (главная силовая установка выбрана, винт подобран, форма кормовой оконечности определена).

По мнению авторов [4] борьба с общей вибрацией корпуса должна стать непрерывным процессом, пронизывающим все стадии проектирования судна. Реализация такого подхода требует разработки серии достаточно простых (по сравнению с моделями для МКЭ) квазиодномерных моделей, подготовка исходных данных для которых занимала бы сравнительно небольшое время. В этом случае последствия любого принятого проектантом решения становятся ему практически сразу известными, что позволяет, при необходимости, оперативно выполнить его коррекцию. Заметим, что сравнительная простота квазиодномерных моделей подразумевает, тем не менее, наличие у них свойств, существенно отличающихся от традиционных свойств балок из справочников по сопротивлению материалов.

### 1. Квазиодномерная модель и получение ее дискретного варианта

Корпус корабля в целом, ряд его отдельных конструкций, многие узлы судовых устройств и систем, элементы устройств освоения океана и других объектов судостроения представляют собой упругую конструкцию, размер которой вдоль некоторой, в общем случае пространственно-криволинейной геометрической оси, много больше максимального поперечного размера любого сечения, проведенного перпендикулярно к этой оси. Все они могут быть охвачены единой физической и расчетной схемой в виде так называемой пространственно-криволинейной упругой конструкции, которая совершает изгибно-продольно-крутильные колебания.

Наличие присоединенных масс жидкости и учет действительного распределения масс моделируемого объекта приводят к тому, что центр масс сечения, в общем случае, не совпадает с центром тяжести его площади. При этом присоединенные массы жидкости, в соответствии с принципом разложения реакций линейных силовых полей, вычисляются отдельно для перемещений по каждой из обобщенных координат. Следовательно, эти массы могут отличаться по величине и положению точки приведения. Учитывая этот факт,



положение центра масс любого сечения должно задаваться отдельно для каждого из перемещений.

Разработка физической модели такой конструкции, а так же методов расчета параметров ее вибрации при действии заданных и распределенных произвольным образом возмущающих периодических нагрузок оказывается актуальной научной и практической задачей. Первые шаги в решении этой задачи были сделаны авторами под руководством д.т.н. профессора В.С.Чувиковского в период работы на кафедре теоретической механики Ленинградского кораблестроительного института [5,6,7,8]. В этих работах была предложена физическая модель квазиодномерной пространственно-криволинейной упругой конструкции (ПКУК) и ее дискретный вариант – пространственно-криволинейная дискретная система (ПКУДС). Последняя представляла собой последовательность конечных элементов, соединенных обобщенными шарнирами деформаций (см. рис.1).

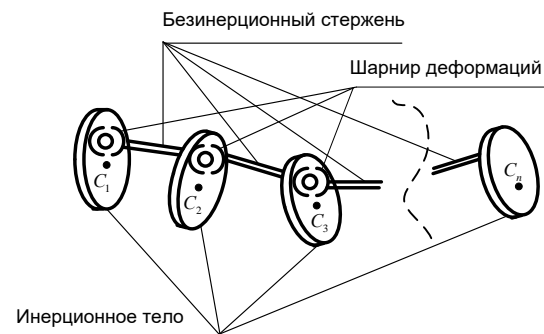


Рис.1. Модель ПКУДС

Эти шарниры (см. рис.2) допускают сдвиг в двух ортогональных (вдоль нормали  $n$  и бинормали  $b$ ) и продольном (вдоль оси  $\tau$ ) направлениях, изгиб в двух ортогональных направлениях и кручение вокруг продольной оси элемента.

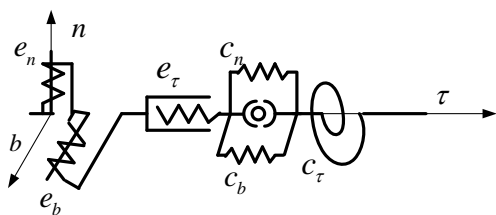


Рис.2. Обобщенный шарнир деформаций

Каждый из элементов, в свою очередь, состоял из безмассового стержня заданной длины, жестко соединенного с твердым телом, обладающим комплексом обобщенных инерционных характеристик (в связи с тем, что центр масс  $C$  такого тела, в общем случае, не лежит на линии отсчета, его матрица инерционных характеристик не имеет диагональной структуры). Кроме того каждый из элементов может опираться на шесть, по числу обобщенных перемещений, независимых упругих опор, точки крепления которых к инерционному диску могут не совпадать ни между собой ни с упругой линией модели. Заметим, что с учетом

квазистатической аналогии (как будет показано ниже), и реальная опора и масса – идентичны по набору упругих характеристик (но с разным знаком жесткости).

Материал модели предполагается линейно-упругим, но с введением в него неупругих сопротивлений. Ввиду малости деформаций и перемещений при вибрации задача решается в геометрически линейной постановке. В качестве основной кинематической гипотезы, позволяющей свести задачу теории упругости к задаче строительной механики, принята гипотеза плоских сечений с поправкой на сдвиг.

Внешняя динамическая нагрузка на рассматриваемую линейную модель в виде ПКУДС предполагается периодической. Она может быть представлена гармоническим рядом. Действие каждой гармоники рассматривается отдельно, а общее решение получается суперпозицией частных. Такой подход вызван тем, что величины присоединенных масс жидкости зависят от формы вынужденных колебаний рассчитываемой конструкции, которая, в свою очередь, изменяется с изменением частоты возбуждения. Приложенная внешняя нагрузка в виде сосредоточенных или распределенных сил и моментов автоматически приводится к инерционному диску элементов.

При расчёте вынужденной вибрации [6] может учитываться статическая (постоянная по величине и направлению) продольная и поперечная нагрузка., что может быть важно, например, для более корректного моделирования упора гребного винта.

## 2. Квазистатическая модель и алгоритм расчета

Коротко остановимся на обсуждении вопроса о квазистатической аналогии и комплексности параметров при решении задач установившихся вынужденных колебаниях [1, 2].

В соответствии с методом кинестатики, если к действующим на механическую систему силам добавить силы инерции, то систему можно рассматривать как находящуюся в равновесии. При действии на линейно-упругую механическую систему гармонически изменяющихся во времени вынуждающих усилий в ней возникают вынужденные установившиеся колебания (вибрация). При этом смещение любой  $i$ -ой точки системы

$$q_i = A_i \sin(\omega t + \alpha_i) \quad \text{и ее ускорение} \\ \ddot{q}_i = -\omega^2 A_i \sin(\omega t + \alpha_i) \quad \text{будут пропорциональны.}$$

Тогда действующая на любую  $i$ -ю точку системы сила инерции  $\bar{F}_i = -m_i \ddot{q}_i = -\omega^2 m_i \bar{q}_i$  может быть трактована как сила упругости, коэффициент жесткости которой будет  $u_i = -\omega^2 m_i$ , а задача о вычислении параметров движения системы сводится к задаче о вычислении параметров ее деформированного состояния при статическом действии амплитудных значений вынуждающих

усилий, что позволяет существенно упростить расчёт установившихся.

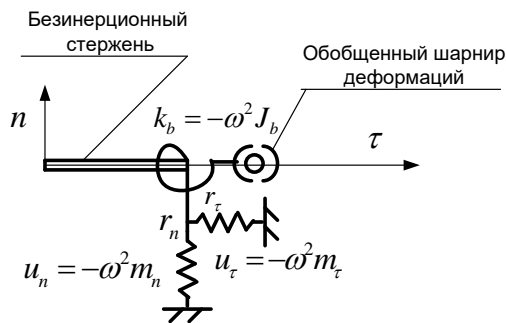


Рис.3. Элемент плоской квазистатической модели.

В качестве достаточно простого частного случая на рисунке 3 изображен вид элемента плоского варианта квазистатической модели (изображение элемента пространственной модели будет громоздким и, в силу этого, плохо воспринимаемым).

При расчетах установившихся колебаний возможно задание инерционно – жесткостных характеристик модели в комплексной форме. Очевидно, что такое задание должно привести к комплексности кинематических и силовых параметров. Известно, что

$$e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t; \quad e^{-i\omega t} = \cos \omega t - i \sin \omega t$$

где  $i = \sqrt{-1}$  - мнимая единица.

Тогда справедливо выражение

$$\begin{aligned} A e^{i(\omega t + \alpha)} &= A \cos(\omega t + \alpha) + i A \sin(\omega t + \alpha) = \\ &= A e^{i\alpha} e^{i\omega t} = \bar{A} e^{i\omega t} = (A \cos \alpha + i A \sin \alpha) e^{i\omega t} = \\ &= (a + ib) e^{i\omega t} \end{aligned}$$

где  $\bar{A} = a + ib$  - комплексное число, при этом

$$A = |\bar{A}| = \sqrt{a^2 + b^2}; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{b}{a}.$$

Анализ выражения показывает, что  $A \cos(\omega t + \alpha)$  есть вещественная часть  $\bar{A} e^{i\omega t}$ , а  $A \sin(\omega t + \alpha)$  - мнимая, т.е.

$$\begin{aligned} A \cos(\omega t + \alpha) &= \operatorname{Re}(\bar{A} e^{i\omega t}), \\ A \sin(\omega t + \alpha) &= \operatorname{Im}(\bar{A} e^{i\omega t}). \end{aligned}$$

Поскольку в общих буквенных зависимостях часто гораздо удобнее оперировать с  $\bar{A} e^{i\omega t}$ , чем с  $A \cos(\omega t + \alpha)$ , то возникает естественный вопрос: нельзя ли вместо всех функций  $A \cos(\omega t + \alpha)$ , входящих в исходные зависимости какой-либо задачи теории колебаний, подставить  $\bar{A} e^{i\omega t}$ , затем получить искомое решение, а в окончательном результате взять только действительную часть? Это, очевидно, вполне допустимо, если, удовлетворив

исходным зависимостям в комплексной форме, мы удовлетворим им порознь для вещественных и мнимых частей величин, входящих в эти зависимости. Этот прием решения задач теории колебаний применим к любым задачам о гармонических колебаниях линейных систем.

Внешние и внутренние неупругие сопротивления, связанные с рассеиванием энергии при колебаниях конструкции, с некоторыми допущениями можно считать пропорциональными скоростям перемещений и деформаций. В отношении внешних сопротивлений дело обстоит: несколько проще: внешняя среда непосредственно сопротивляется изменению перемещения тела. Природа внутренних сопротивлений более сложна. В частности, они вызваны внутренними свойствами материала. Однако и в этом случае, согласно [1, 2], учет внутренних сопротивлений по гипотезам Фохта и Сорокина может быть выполнен приложением сил внутреннего сопротивления, пропорциональным скорости деформации.

Обобщим сказанное. Пусть колебания механической системы определяются любыми исходными линейными соотношениями между искомыми обобщенными координатами  $q_1, q_2, \dots, q_n$  и обобщенными внешними силами  $Q(x_1, x_2, \dots, x_m, t)$ , зависящими от времени и некоторых неизменных во времени параметров  $x_1, x_2, \dots, x_m$ . К этим соотношениям относятся, в частности, линейные дифференциальные уравнения и граничные условия. Силы внешних сопротивлений пока учитывать не будем.

Рассмотрим одно из таких соотношений, в которое входят силы упругости и внутреннего сопротивления. Пусть силы упругости выражаются неким линейным оператором  $L_q(c_1 q_1, c_2 q_2, \dots, c_n q_n)$ , где  $c_j$  - коэффициенты жесткости, соответствующие обобщенным координатам  $q_j$ . Тогда силы внутренних сопротивлений определяются аналогичным оператором  $L_q(c_1 v_1 \frac{\partial q_1}{\partial t}, c_2 v_2 \frac{\partial q_2}{\partial t}, \dots, c_n v_n \frac{\partial q_n}{\partial t})$ , если через  $v_j$  обозначены коэффициенты сопротивления.

Представив обобщенную силу в комплексной форме  $\bar{Q}(x_1, x_2, \dots, x_m) e^{i\omega t}$ , необходимо разыскивать колебания системы так же в комплексной форме  $\bar{q}_j = \bar{A}_j e^{i\omega t}$ . При этом сумма сил упругости и сил сопротивления выразится оператором

$$L_q(\bar{c}_1 q_1, \bar{c}_2 q_2, \dots, \bar{c}_n q_n), \quad \text{где } \bar{c}_j = c_j + i\omega v_j.$$

Следовательно, в итоге рассматриваемое соотношение примет такую же аналитическую форму, какую оно имело бы при отсутствии внутренних сопротивлений, но коэффициенты жесткости окажутся комплексными.

При вычислении комплексных жесткостей обычно удобнее всего вводить комплексные модули упругости, являющиеся, в сущности, самыми элементарными характеристиками жесткости:

$\bar{E} = E(1 + i\omega v_1)$ ;  $\bar{G} = G(1 + i\omega v_2)$ , где  $E$  и  $G$  - модуль изгиба и модуль сдвига;  $v_1$  и  $v_2$  - коэффициенты внутреннего сопротивления по изгибу и по сдвигу соответственно,  $\omega$  - частота вынужденных колебаний.

Заметим, что комплексное представление модулей  $\bar{E}$  и  $\bar{G}$  учитывает отставание по фазе на  $\pi/2$  сил сопротивления от сил упругости.

При необходимости учета сил и моментов сил внешнего сопротивления следует учесть их зависимость от абсолютных обобщенных скоростей. Очевидно, что схема рассуждений может быть аналогичной, но учет удобнее выполнить комплексностью инерционных характеристик

$$\bar{m}_k = m_k(1 - i \frac{v_3}{m_k \omega}); \bar{I}_k = I_k(1 - i \frac{v_4}{I_k \omega}),$$

где  $m_k$  и  $I_k$  - масса и момент инерции масс  $k$ -ого элемента,  $v_3$  и  $v_4$  - коэффициенты сопротивления по линейному и угловому перемещениям соответственно.

Заметим, что комплексное представление инерционных характеристик  $\bar{m}_k$  и  $\bar{I}_k$  учитывает отставание на  $\pi/2$  сил инерции от сил сопротивления (и на  $\pi$  от сил упругости).

Если внешние усилия, действующие на механическую систему, будут содержать слагаемые, содержащие как  $\sin \omega t$  так и  $\cos \omega t$ , их так же следует записать в комплексной форме.

### 3. Учет влияния конструктивных модулей с одним районом сопряжения

В процессе проектирования судна даже на ранних его стадиях встает вопрос об оценке влияния на параметры вибрации корпуса монтажа некоторых конструкций или установок, протяженность которых вдоль продольной оси корпуса относительно не велика (ниже будем называть их конструктивными модулями). Очевидно, что в процессе совместной вибрации со стороны такого модуля на корпус судна будут передаваться два типа усилий: первые из них обусловлены кинематическим возбуждением точки сопряжения корпуса и КМ, а вторые – внешними вынуждающими усилиями, приложенными к КМ.

Первая попытка оценки такого влияния была сделана при участии авторов в [3]. Она показала существенность такого фактора и потребовала дальнейшего развития метода расчета. В процессе работы был предложен следующий подход [9]: судно и КМ моделируются ПКУДС; затем для модели КМ в точке сопряжения рассчитываются значения реакций, возникающих при единичном кинематическом возбуждении этой точки по каждому из смещений (линейных и угловых); после этого для

модели КМ в точке сопряжения рассчитываются значения опорных реакций, возникающих от действия заданной моногармонической нагрузки. На заданной частоте вибрации реакции первого типа учитывались коррекцией инерционных свойств модели ПКУДС в точке сопряжения с моделью КМ, а реакции второго типа – приложением в этой точке комплекта некоторой дополнительной нагрузки (см. рис.4). На рисунке  $[M^*]$  - блочная матрица, отражающая добавление в точку сопряжения ПКУДС новых обобщенных инерционных свойств (например, изгибающего момента от линейного смещения точки сопряжения, либо поперечной силы, возникающей при угловых колебаниях), а  $[Q^*]$  - диагональная матрица дополнительных внешних усилий, элементы которой отражают влияние внешних усилий, приложенных к КМ.

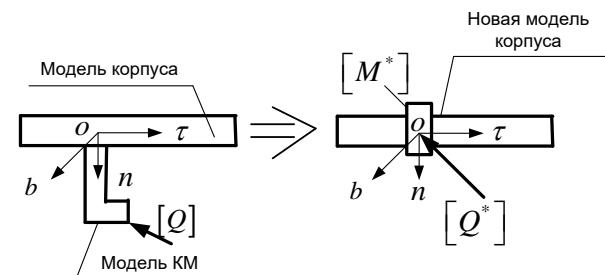


Рис.4. Учет совместности колебаний.

Такой метод расчета совместной вибрации судового корпуса и его КМ не вносил принципиальных изменений в разработанные ранее модели, хотя и приводил к большему количеству элементов обобщенной матрицы инерции за счет возникновения связанности видов колебаний.

### 4. Алгоритм расчета

Наиболее эффективным методом решения одномерных и квазиодномерных задач вибрации является метод парциальных откликов [2]. Он относится к группе методов, основанных на непрямом сведении краевой задачи (в котором искомое решение должно удовлетворять некоторым условиям на концах промежутка измерения переменной) к задаче Коши (задача с начальными условиями, заданными в одной точке). При его реализации исходная краевая задача заменяется двумя задачами Коши относительно неких параметров, называемых парциальными откликами (ПО), обусловленными свойствами моделируемого объекта, и парциальными параметрами (ПП), обусловленными ПО и внешней нагрузкой. Для вычисления внутренних параметров краевой задачи в расчетном сечении с помощью ПО и ПП для сопрягающихся парциальных частей записываются линейные зависимости.

В качестве парциальных откликов (ПО) в работах [6,8] были приняты податливости (т.е. смещения сечения свободного конца рассматриваемой части модели под действием единичных усилий). В задачах механики использование податливостей в качестве парциальных откликов предпочтительнее, так как действующие усилия, как правило, являются

причинами, а смещения – их следствиями. Раскрытие статической неопределенности при стыковке левой и правой частей квазистатической модели, являющихся в МПО парциальными системами, позволяет найти в этом сечении параметры ее напряженно-деформированного состояния (внутренние усилия, а так же линейные и угловые смещения).

Напомним, что в общем случае все эти величины будут комплексными. Если исследователя интересуют амплитудные значения параметров (а именно так обычно и происходит), их вычисление по действительной и мнимой частям параметров не представляет труда.

### 5. Программа расчета

Первые варианты программы расчета параметров установившейся вибрации были выполнены еще в середине 80-х годов прошлого века и легли в основу диссертационных работ авторов. Последний вариант, существенно модифицированный Д.А.Николаевым, приведен в интернете [10]. Вариант позволяет на любом персональном компьютере достаточно быстро рассчитывать параметры установившейся вибрации (либо статического деформирования) пространственно-криволинейных одиночных балок (хотя название «балка» уже явно не соответствует квазиодномерным моделям с обсужденными выше свойствами), в том числе замкнутых в кольцо, а так же плоских рам. При этом в обсужденную выше квазистатическую модель был внесен ряд существенных улучшений (например, автоматическое формирование массивов инерционно-жесткостных характеристик при выборе

профиля поперечного сечения модели из предлагаемого перечня, модификация конечного элемента, что позволило получить более корректную модель и, как следствие, результаты расчета; непосредственный учет присоединения КМ в виде амортизированной массы, что является наиболее распространенным случаем, а так же и некоторые другие). Программа содержит два модуля; модуль полного расчета пространственных деформаций и модуль графической подготовки исходных данных и вывода результатов для расчета конструкций лежащих в плоскости (автор не располагает подходящими средствами трехмерной графики). Программа допускает использование внешнего независимого источника подготовки данных, в том числе трехмерных и внешней программы обработки результатов расчета. Она снабжена комментарием поясняющим её назначение, алгоритм, работу и возможные пути модернизации (например, корректный расчет открытых тонкостенных профилей, что в приведённом варианте возможно только в ручном режиме).

### Заключение

1. Контроль параметров общей вибрации корпуса судна в процессе его проектирования должен носить непрерывный характер, при этом модели для расчета этих параметров должны усложняться по мере уточнения его модели.

2. Разработана физическая модель, ее квазистатический вариант, алгоритм и программа расчета, позволяющая найти амплитудные значения параметров вибрации исходной модели.

### Литература

1. Александров В.Л., Матлах А.П., Поляков В.И. Борьба с вибрацией на судах. - СПб.: МорВест, 2005.
2. Чувиковский В.С. Численные методы расчетов в строительной механике корабля. – Л.: Судостроение, 1976. с.
3. Чувиковский В.С., Мелконян А.Л. Совместная вынужденная вибрация судового корпуса и его перекрытий // журнал Судостроение. – 1986. №8. –стр. 5-6.
4. Чувиковский В.С., Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Практическая оптимизация вибрационных характеристик судов в процессе их проектирования, постройки и модернизации. – Тезисы докладов на V ВНТК «Совершенствование технологии эксплуатации корпусов судов. – Л., Судостроение, 1989.
5. Мелконян А.Л. Математическая модель для исследования связанных изгибно-продольных вынужденных колебаний плоско-криволинейной упругой конструкции при наличии статической продольной нагрузки. - депонировано ВИНТИ 7692-В87, 02.11.1987, 12стр.
6. Мелконян А.Л. Алгоритм расчета связанных изгибно-продольных вынужденных установившихся колебаний плоско-криволинейной упругой дискретной системы при наличии статической продольной нагрузки. - депонировано ВИНТИ 367-В88, 15.01.1988, 14стр.
7. Николаев Д.А., Чувиковский В.С. Вынужденные связанные изгибно-крутильно-продольные колебания корпусов судов и судовых конструкций как пространственно-криволинейных упругих конструкций. Тезисы доклада на IV научно-технической конференции «Совершенствование эксплуатации и ремонта корпусов судов», Калининград, 1986
8. Николаев Д.А. Алгоритм расчета связанных вынужденных изгибно-крутильно-продольных колебаний пространственно-криволинейных упругих систем. –Л.: БАУ, Судостроение, сер.2, вып. 4, 1986
9. Мелконян А.Л. Математическая модель для исследования вибрации судового корпуса и конструктивного модуля с одним районом сопряжения малой протяженности. РУМБ, ДР-3253, 21.03.1990, сб. рефератов ДР, ВИМИ, вып. 8, 1990, 7с.
10. <http://www.d-nik.de> PC-Welt (Эффективное решение. Расчет изогнутых балок и рам.). 08.11.2018

## References

1. Alexandrov V.L., Matlakh A.P., Polyakov V.I. Borba s vibratsiyey na sudah. SPb, MorVest, 2005
2. Chuvikovskiy V.S. Chislennyye metody raschetov v stroitelnoy mehanike korabliya. L, Sudostroenie, 1976
3. Chuvikovskiy V.S., Melkonian A.L. (1986), Sovmestnaya vinugdannaya vibratsiya sudovogo korpusa I ego perekritey. Jurnal Sudostroenie, 8, 5-6
4. Chuvikovskiy V.S., Melkonian A.L., Nikolaev D.A. Prakticheskaya optimizatsiya vibratsionnykh parametrov sudov v protsesse ikh proektirovaniya, postroyke I modernizatsii. (5 VNTK Sovershenstvovanie tekhnologii ekspluatatsii korpusov sudov). L. Sudostroenie. 1989
5. Melkonian A.L. (1987), Matematicheskaya model dlya issledovaniy svyazannykh izgibno-prodolnykh vinugdennykh kolebaniy plosko-krivolineynoy uprugoy konstruksii pri nalichii staticheskoy prodolnoy nagruzki. VINITI 7692-V87. 12.
6. Melkonian A.L. (1988), Algoritm rascheta svyazannykh izgibno-prodolnykh vinugdennykh kolebaniy plosko-krivolineynoy uprugoy konstruksii pri nalichii staticheskoy prodolnoy nagruzki. VINITI 367-V88. 14.
7. Nikolaev D.A., Chuvikovskiy V.S., Vinugdennyye svyazaniye izgibno-krutilno-prodolnyye kolebaniya prostranstvenno-krivolineynykh uprugikh sistem. (4 NTK Sovershenstvovanie ekspluatatsii I remonta korpusov sudov). Kaliningrad. 1986
8. Nikolaev D.A. (1986)/ Algoritm rascheta svyazannykh vinugdennykh izgibno-krutilno-prodolnyye kolebaniya kopusov sudov I sudovykh konstruksiy kak prostranstvenno-krivolineynykh uprugikh konstruksiy. (L, BAU, Sudostroenie, 2(4),
9. Melkonian A.L. (1990), Matematicheskaya model dlya issledovaniya vibratsiya sudovogo korpusa I konstruktivnogo modulya s odnim rayonom sopriazheniya maloy protiygennosti. DR- 3253. VIMI, 8. 7
10. <http://www.d-nik.de> PC-Welt (Efektivnoe reshenie. Raschet izognutiyh balok I ram). 08.11.2018

УДК 629.12.073.243.4

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОПЕРЕЧНОЙ КАЧКИ СУДНА, ВЫЗЫВАЕМЫХ НЕЛИНЕЙНЫМИ СИЛАМИ, ОБУСЛОВЛЕННЫМИ СУММОЙ И РАЗНОСТЬЮ ЧАСТОТ НА БИХРОМАТИЧЕСКОМ ВОЛНЕНИИ

**Виктория Юрьевна Семенова**

Д.т.н., профессор, заведующая кафедрой теории корабля  
(Санкт-Петербургский государственный морской технический университет)  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10  
тел. 8-905-229-71-98; e-mail: sem\_viktoria@mail.ru

**Киав Тхура**

Аспирант

(Санкт-Петербургский государственный морской технический университет)  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10  
тел.8-904-612-61-68; e-mail: ktra29188@gmail.com

### Аннотация

В статье рассматривается метод расчета амплитудно-частотных характеристик поперечных видов качки судна, обусловленных суммой и разностью на бихроматическом волнении в условии жидкости бесконечной глубины. Расчет амплитуд, обусловленных суммой и разностью частот, производился на основании решения системы дифференциальных уравнений с учетом нелинейных сил, обусловленных суммой и разностью частот. Нелинейные силы, действующие на судно, определяются на основании гипотезы плоских сечений. В работе проводится анализ влияния различных сочетаний частот бихроматического волнения на амплитуды поперечно-горизонтальной, вертикальной и бортовой качки, обусловленных суммой и разностью частот. Приводятся сравнения данных амплитуд с амплитудами, обусловленными удвоенным значением частоты. Показано значительное влияние нелинейных сил на амплитуды качки, когда выполняются следующие соотношения частот бихроматического волнения когда  $\omega_1 - \omega_2 = \omega_0$  и  $\omega_1 - \omega_2 = \omega_\zeta$  и  $\omega_1 + \omega_2 = \omega_0$  и  $\omega_1 + \omega_2 = \omega_\zeta$ .

**Ключевые слова:** Амплитудно-частотные характеристики, нелинейные силы второго порядка, метод интегральных уравнений, бихроматическое волнение, сумма частот, разность частот, потенциал, гипотеза плоских сечений.

## THE DETERMINATION OF AMPLITUDE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF LATERAL MOTIONS OF THE SHIP DUE TO THE SUM AND DIFFERENCE OF FREQUENCIES ON THE BICHROMATIC WAVES.

**Viktoriya Yu. Semenova**

Dr.Sci.Tech., the professor, the head of DEPARTMENT OF THEORY OF THE SHIP,  
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
tel: +7 (905) 229-71-98 e-mail: sem\_viktoria@mail.ru

**Kyaw Thura**

post-graduate student

STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
tel:+7(904)612-61-68 e-mail:ktra29188@gmail.com

### Abstract

The article deals with the method of calculation of amplitude frequency characteristic of lateral motions of the ship due to the sum and difference frequencies on the bichromatic waves in deep water. The amplitudes due to the sum and difference of frequencies were calculated on the basis of the solution of a system of differential equations taking calculation of nonlinear forces caused by the sum and difference of frequencies. Nonlinear forces acting on a ship are determined on the basis of the slender body theory. The article analyzes the influence of various combinations of bichromatic wave frequencies on the amplitude values of amplitudes of sway, heav and roll of the ship, due to the sum and difference frequencies. Comparisons of these characteristics with characteristics due to doubled frequency are given. The significant influence of nonlinear forces on the amplitudes of motions is shown when the following ratios of the frequencies of the bichromatic wave are performed:  $\omega_1 - \omega_2 = \omega_0$  and  $\omega_1 - \omega_2 = \omega_\zeta$  and  $\omega_1 + \omega_2 = \omega_0$  and  $\omega_1 + \omega_2 = \omega_\zeta$ .

**Key words:** Amplitude frequency characteristic, nonlinear forces of the second order, method of integral equations, bichromatic waves, the sum of frequencies, potential, slender body theory.

**Введение**

В работах авторов [1] и [2] был рассмотрен метод, позволяющий рассчитывать все категории нелинейных сил второго порядка, возникающих при качке судна на бихроматическом волнении и обусловленных суммой и разностью частот. Воздействуя на судно в условиях бихроматического волнения данные нелинейные силы и моменты, обусловленные как суммой, так и разностью частот вызывают соответствующие амплитуды поперечно-горизонтальной, вертикальной и бортовой качки.

На основании разработанного метода, в настоящей работе рассматривается определение амплитудно-частотных характеристик поперечных видов качки судов на бихроматическом волнении.

**1. Описание расчетного метода**

С учетом нелинейных гидродинамических сил второго порядка система дифференциальных уравнений поперечно-горизонтальной, бортовой, и вертикальной качки будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 & M\ddot{\eta}_g + \lambda_{22\pm}\ddot{\eta}_g + \mu_{22\pm}\dot{\eta}_g + \lambda_{24\pm}\ddot{\theta} + \mu_{24\pm}\dot{\theta} \\
 &= F_{H\pm\Sigma}^{(2)} e^{-j(\omega_1 \pm \omega_2)t} \\
 & M\ddot{\zeta}_g + \lambda_{33\pm}\ddot{\zeta}_g + \mu_{33\pm}\dot{\zeta}_g + \rho g S_{wl} \zeta_g \\
 &= F_{V\pm\Sigma}^{(2)} e^{-j(\omega_1 \pm \omega_2)t} \\
 & J_{XX}\ddot{\theta} + \lambda_{44\pm}\ddot{\theta} + \mu_{44\pm}\dot{\theta} + Dh_0\theta + \lambda_{24\pm}\ddot{\eta}_g + \\
 & \mu_{24\pm}\dot{\eta}_g = M_{X\pm\Sigma}^{(2)} e^{-j(\omega_1 \pm \omega_2)t} \quad (1)
 \end{aligned}$$

В соответствии с правыми частями систем, решение будем искать в форме:

$$\begin{aligned}
 \eta_g(t) &= \eta_{g\pm}^{(2)} \sin((\omega_1 \pm \omega_2)t + \delta_{\eta\pm}^{(2)}); \\
 \zeta_g(t) &= \zeta_{g\pm}^{(2)} \sin((\omega_1 \pm \omega_2)t + \delta_{\zeta\pm}^{(2)}); \\
 \theta(t) &= \theta_{\pm}^{(2)} \sin((\omega_1 \pm \omega_2)t + \delta_{\theta\pm}^{(2)}). \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{H\pm\Sigma}^{(2)} &= F_{H\pm 22}^{(2)} + F_{H\pm 44}^{(2)} + F_{H\pm 23}^{(2)} + F_{H\pm 34}^{(2)} + \\
 & F_{H\pm 77}^{(2)} + F_{H\pm 2,0+7}^{(2)} + F_{H\pm 3,0+7}^{(2)} + F_{H\pm 4,0+7}^{(2)}; \\
 F_{V\pm\Sigma}^{(2)} &= F_{V\pm 22}^{(2)} + F_{V\pm 44}^{(2)} + F_{V\pm 33}^{(2)} + F_{V\pm 24}^{(2)} + \\
 & F_{V\pm 77}^{(2)} + F_{V\pm 2,0+7}^{(2)} + F_{V\pm 3,0+7}^{(2)} + F_{V\pm 4,0+7}^{(2)}; \\
 M_{X\pm\Sigma}^{(2)} &= M_{X\pm 22}^{(2)} + M_{X\pm 44}^{(2)} + M_{X\pm 23}^{(2)} + M_{X\pm 34}^{(2)} + \\
 & M_{X\pm 77}^{(2)} + M_{X\pm 2,0+7}^{(2)} + M_{X\pm 3,0+7}^{(2)} + M_{X\pm 4,0+7}^{(2)}. \quad (3)
 \end{aligned}$$

где каждая из составляющих определяется на основании гипотезы плоских сечений. Все составляющие сил и моментов определяются на основании работ авторов [1] и [2].

**2. Анализ результатов расчета**

Расчеты нелинейных амплитудно-частотных характеристик на бихроматическом волнении

проводились для следующих судов, характеристики которых приведены в таблице 1.

Таблица 1-

Название судна	L,м	B,м	T,м	δ	α
Волго-Балт	110	13	3,63	0,83	0,9
Сухогруз Новгород	138	20,6	9	0,68	0,79
Т/х Любовь Орлова	90	16,2	4,65	0,598	0,732
Контейнеровоз Художник Сарьян	157,2	25,4	9,22	0,626	0,73
Навалочное судно Капитан Гусев	111,45	16,4	4,8	0,798	0,896
Балкер Капитан Панфилов	134	20,6	9,4	0,779	0,884
Лесовоз Николай Новиков	140	21	8,68	0,744	0,833
Танкер Мир	276,9	44,95	17	0,785	0,857
Лихтеровоз Алексей Косыгин	232	32	10,6	0,616	0,853
Танкер Баскунчак	74	12	4,65	0,71	0,799

Расчеты амплитуд, обусловленных действием нелинейных сил от суммы частот, проводились для четырех вариантов сочетаний частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , рассмотренных выше. Для каждого из вариантов расчета были получены зависимости амплитуд вторых гармоник поперечно-горизонтальной, вертикальной и бортовой качки от частоты  $\omega_2$ , которые приведены на графиках 1-4. При этом амплитуды вторых гармоник представлены в следующем безразмерном виде:

$$\bar{\eta}_+^{(2)} = \frac{\eta_+^{(2)} B / 2}{a_{w1} a_{w2}}; \quad \bar{\zeta}_+^{(2)} = \frac{\zeta_+^{(2)} B / 2}{a_{w1} a_{w2}}; \quad \bar{\theta}_+^{(2)} = \frac{\theta_+^{(2)} (B / 2)^2}{a_{w1} a_{w2}} \quad (4)$$

При равенстве частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , также как и в случае нелинейных сил, обусловленных суммой частот, амплитуды должны выполнять следующие условия

$$\begin{aligned}
 \eta_+^{(2)}(\omega_1 + \omega_2) &= 2\eta^{(2)}(2\omega_2); \\
 \zeta_+^{(2)}(\omega_1 + \omega_2) &= 2\zeta^{(2)}(2\omega_2); \\
 \theta_+^{(2)}(\omega_1 + \omega_2) &= 2\theta^{(2)}(2\omega_2) \quad (5)
 \end{aligned}$$

В целях проверки данного условия для каждого вида качки амплитуды вторых гармоник, обусловленные суммой частот приведены в сравнении с удвоенными значениями амплитуд вторых гармоник, обусловленных влиянием двойной частоты [3]. Из приведенных на рис.1-4 результатов сравнений видно, что при всех рассмотренных вариантах сочетаний частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$  при их равенстве выполняется условие (5) для всех видов колебаний. В случае когда  $\omega_1=1,01$  1/с и  $\omega_2$  изменяется в пределах от 0,1 до 1 1/с для большинства из рассмотренных судов амплитуды вторых гармоник поперечно-горизонтальной качки  $\bar{\eta}_+^{(2)}$ , обусловленные суммой частот соизмеримы со значениями  $2\bar{\eta}^{(2)}(2\omega_2)$  (рис.1 - 4). В ряде случаев

для зависимостей  $\bar{\eta}_+^{(2)} = f(\omega_2)$  характерно наличие вторичных резонансов, обусловленных влиянием резонансных амплитуд бортовой качки. Так, для контейнеровоза Художник Сарьян максимальные значения амплитуд  $\bar{\eta}_+^{(2)}$  наблюдаются на частоте  $\omega_2=0,6$ , соответствующей собственной частоте бортовой качки (рис.4)



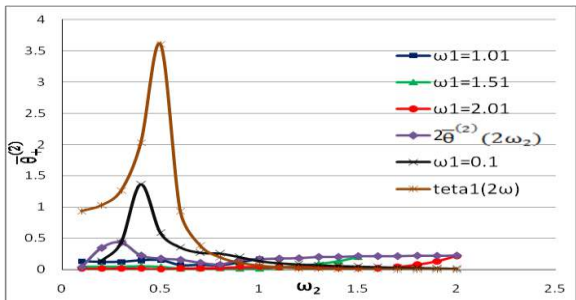
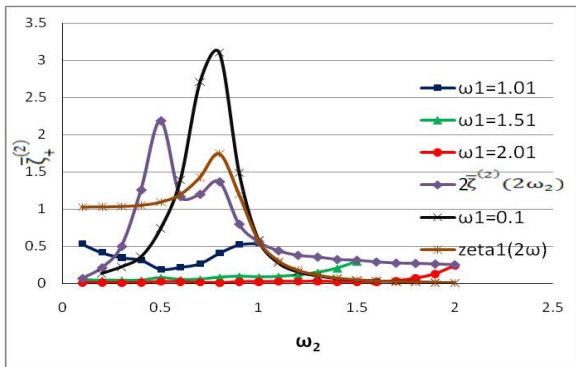
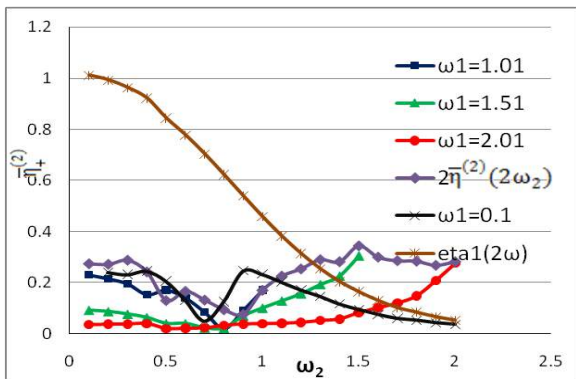


Рис.1 Амплитудно-частотные характеристики вторых гармоник поперечно-горизонтальной, вертикальной и бортовой качки, обусловленных суммой частот для балкера Капитан Панфилов

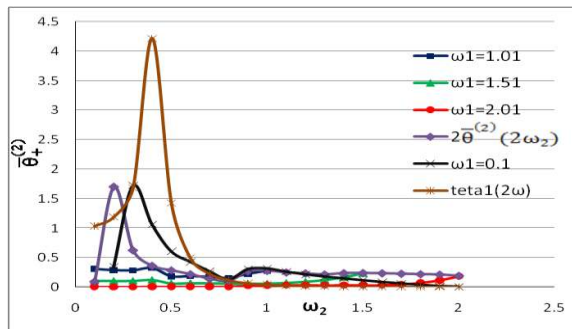
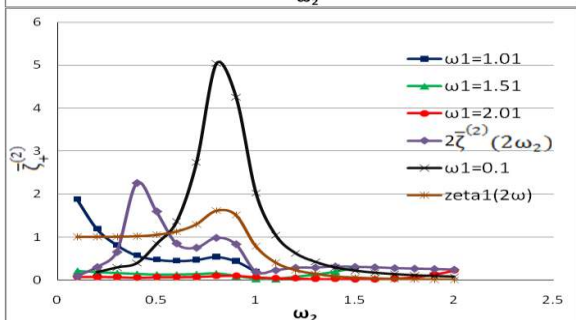
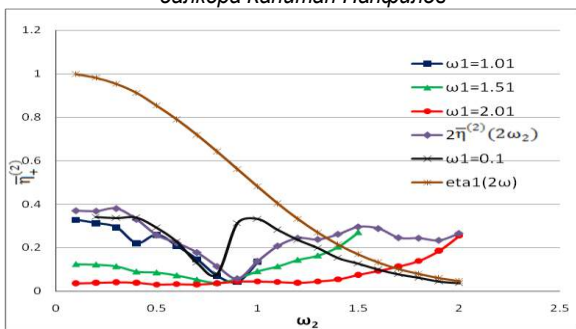


Рис.2 Амплитудно-частотные характеристики вторых гармоник поперечно-горизонтальной, вертикальной и бортовой качки, обусловленных суммой частот для сухогруза Новгород

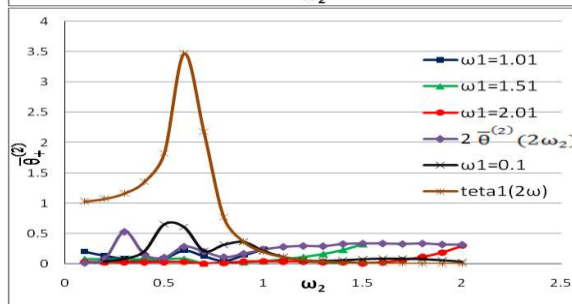
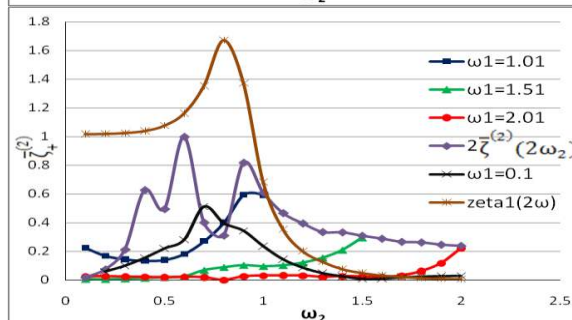
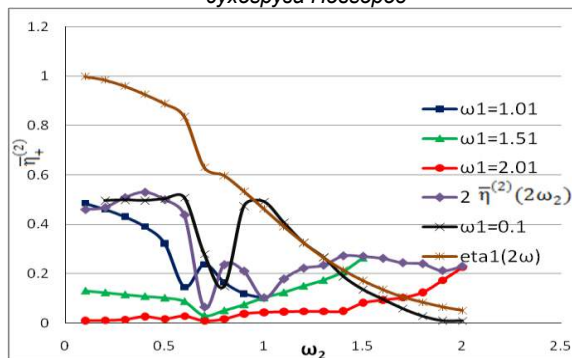
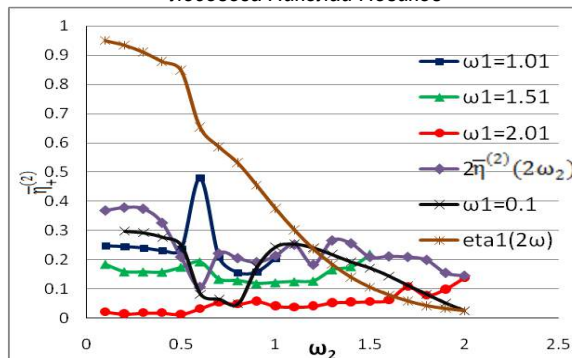


Рис.3 Амплитудно-частотные характеристики вторых гармоник поперечно-горизонтальной, вертикальной и бортовой качки, обусловленных суммой частот для лесовоза Николай Новиков



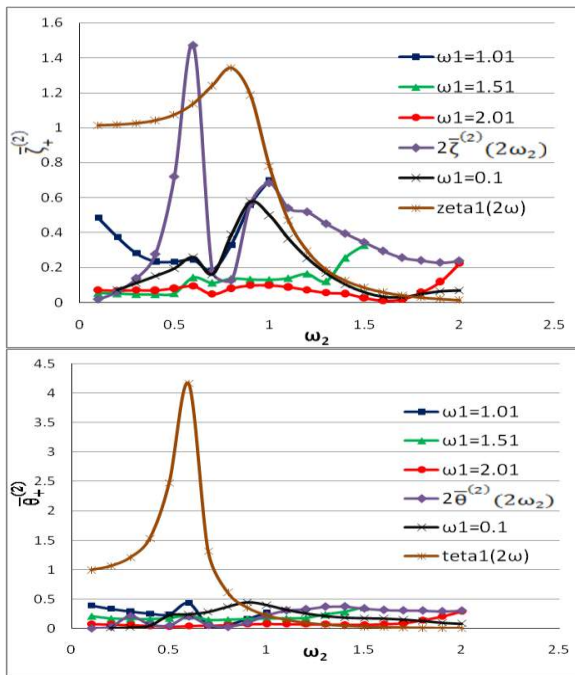


Рис.4 Амплитудно-частотные характеристики вторых гармоник поперечно-горизонтальной, вертикальной и бортовой качки, обусловленных суммой частот для контейнеровоза Художник Сарьян

При сочетаниях частот  $\omega_1=1,51$  1/с и  $\omega_2$  находящейся в пределах от 0,1 до 1,5 1/с и  $\omega_1=2,01$  1/с и  $\omega_2$  находящейся в пределах от 0,1 до 2 1/с амплитуды  $\bar{\eta}_+^{(2)}$ , обусловленные суммой частот значительно меньше соответствующих значений  $2\bar{\eta}^{(2)}(2\omega_2)$ . Так, для балкера Капитан Панфилов и лесовоза Николай Новиков в случае  $\omega_1=1,51$  и  $\omega_2=0,1$  значения амплитуд  $\bar{\eta}_+^{(2)}$  в три раза меньше амплитуд  $2\bar{\eta}^{(2)}(2\omega_2)$  (рис.1,3). В случае этих двух вариантов расчета амплитуды  $\bar{\eta}_+^{(2)}$  становятся соизмеримыми с  $2\bar{\eta}^{(2)}(2\omega_2)$  только когда значение  $\omega_2 \rightarrow \omega_1$ .

В случае когда  $\omega_1=0,1$  и  $\omega_2$  изменяется в пределах от 0,1 до 2 1/с амплитуды поперечно-горизонтальных колебаний, обусловленных суммой частот соизмеримы со значениями амплитуд  $2\bar{\eta}^{(2)}(2\omega_2)$  на большей части диапазона частот. При  $\omega_2 < 1,25$  в ряде случаев наблюдается практически полное совпадение результатов. Практически для всех рассмотренных судов для зависимости  $\bar{\eta}_+^{(2)} = f(\omega_2)$  характерно наличие максимумов в зоне частот  $0,8 < \omega_2 < 1$ , соответствующих положению основного резонанса вертикальной качки. В зоне частот  $\omega_2 > 1,25$  безразмерные амплитуды  $\bar{\eta}_+^{(2)}$  становятся соизмеримыми с безразмерными амплитудами первого порядка  $\bar{\eta}^{(1)}$  (рис.1-4).

Расчеты амплитуд вторых гармоник вертикальной качки, обусловленных суммой частот, показали, что в случае сочетания частот  $\omega_1=1,01$  1/с и  $\omega_2$  изменяющейся в пределах от 0,1 до 1 1/с амплитуды

$\bar{\zeta}_+^{(2)}$  в несколько раз больше соответствующих амплитуд  $2\bar{\zeta}^{(2)}(2\omega_2)$  в зоне частот  $\omega_2 < 0,25$ . Например, отношение  $\bar{\zeta}_+^{(2)} / 2\bar{\zeta}^{(2)}$  при  $\omega_2=0,2$  и  $\omega_1=1,01$  для сухогруза Новгород, лесовоза Новиков и контейнеровоза Художник Сарьян составляют соответственно 5, 2,5 и 4. При значениях частот  $\omega_2 > 0,25$ , наоборот, амплитуды  $\bar{\zeta}_+^{(2)}$  в большинстве случаев во много раз меньше соответствующих значений  $2\bar{\zeta}^{(2)}(2\omega_2)$  (рис. 1-4).

При сочетаниях частот  $\omega_1=1,51$  1/с и  $\omega_2$  находящейся в пределах от 0,1 до 1,5 1/с и  $\omega_1=2,01$  1/с и  $\omega_2$  находящейся в пределах от 0,1 до 2 1/с амплитуды вторых гармоник вертикальной качки  $\bar{\zeta}_+^{(2)}$  пренебрежимо малы по сравнению с амплитудами  $2\bar{\zeta}^{(2)}(2\omega_2)$  на всем диапазоне частот, за исключением случая когда  $\omega_2 = \omega_1$ .

Максимальные значения амплитуды вертикальной качки  $\bar{\zeta}_+^{(2)}$  имеют место при сочетании частот  $\omega_1=0,1$  1/с и  $\omega_2$  находящейся в пределах от 0,1 до 2 1/с. В этом случае для зависимостей  $\bar{\zeta}_+^{(2)} = f(\omega_2)$  характерно наличие резонанса, имеющего место при равенстве суммы частот  $\omega_2 + \omega_1$

собственной частоте вертикальной качки  $\omega_\zeta$  (рис.1.2). Для ряда судов безразмерные амплитуды  $\bar{\zeta}_+^{(2)}$  в зоне резонанса в 2-5 раз больше амплитуд, обусловленных влиянием удвоенного значения частоты (рис.1.2). В других случаях может наблюдаться равенство значений  $\bar{\zeta}_+^{(2)}$  и  $2\bar{\zeta}^{(2)}(2\omega_2)$ . Такое равенство имеет место, например, для лесовоза Николай Новиков (рис.3) и контейнеровоза Художник Сарьян (рис.4).

В зоне супергармонического резонанса вертикально качки, имеющего место в зоне частот  $\omega_2 < 0,6$ , а также в зоне частот  $\omega_2 > 1,2$  значения  $\bar{\zeta}_+^{(2)}$  во много раз меньше соответствующих амплитуд  $2\bar{\zeta}^{(2)}(2\omega_2)$ . Результаты расчетов амплитуд вторых гармоник бортовой качки, обусловленных суммой частот, показали, что в случае сочетания частот  $\omega_1=1,01$  1/с и  $\omega_2$  изменяющейся в пределах от 0,1 до 1 1/с значения безразмерных амплитуд  $\bar{\theta}_+^{(2)}$  для большинства судов соизмеримы со значениями амплитуд, обусловленных удвоенным значением частоты  $2\bar{\theta}^{(2)}(2\omega_2)$  в зоне изменения частот  $0,4 < \omega_2 < 1$ . Так, для балкера Капитан панфилов и лесовоза Николай Новиков при сочетании частот  $\omega_1=1,01$  и  $\omega_2=0,5$  имеет место равенство амплитуд  $\bar{\theta}_+^{(2)}$  и  $2\bar{\theta}^{(2)}(2\omega_2)$ .

В случае сочетаний  $\omega_1=1,51$  1/с и  $\omega_2$  находящейся в пределах от 0,1 до 1,5 1/с и  $\omega_1=2,01$  1/с и  $\omega_2$  находящейся в пределах от 0,1 до 2 1/с, также как и в случае вертикальной качки, амплитуды, обусловленные суммой частот пренебрежимо малы по сравнению с  $2\bar{\theta}^{(2)}(2\omega_2)$  и могут в дальнейшем не учитываться в расчетах качки на нерегулярном волнении.

Наибольшие значения безразмерные амплитуды вторых гармоник бортовой качки  $\bar{\theta}_+^{(2)}$  имеют место, когда  $\omega_1=0,1$  1/с и  $\omega_2$  находится в пределах от 0,101 до 2 1/с. В этом случае, для зависимостей  $\bar{\theta}_+^{(2)} = f(\omega_2)$  характерно наличие резонанса, когда сумма частот  $\omega_2 + \omega_1$  равна собственной частоте бортовой качки  $\omega_\theta$ . На рис.1-4 данные резонансы имеют место соответственно когда  $\omega_2 = \omega_\theta - \omega_1$ . В зоне резонансов амплитуды  $\bar{\theta}_+^{(2)}$  могут быть в 3-7 раз больше соответствующих амплитуд качки  $2\bar{\theta}^{(2)}(2\omega_2)$ . Для зависимостей амплитуд бортовой качки  $\bar{\theta}_+^{(2)} = f(\omega_2)$  в зоне частот  $0,8 < \omega_2 < 1$  также характерно наличие максимумов, обусловленных влиянием резонансных амплитуд вертикальной качки  $\zeta^{(1)}$  (рис.1,4)

На основании проведенного анализа ясно, что при выполнении расчетов, в первую очередь, необходимо учитывать амплитуды вторых гармоник поперечных видов качки, обусловленных суммой частот, когда  $\omega_1 < \omega_2$  и  $\omega_2$  находится в пределах от 0,1 до 1,5 1/с. При больших значениях  $\omega_2 > 1,5$  учетом данных амплитуд можно пренебречь.

Расчет амплитуд, обусловленных разностью частот, производился на основании решения системы дифференциальных уравнений (1) с учетом нелинейных сил, обусловленных разностью частот. Расчеты проводились для тех же вариантов сочетаний частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , что и нелинейные силы. Для каждого из вариантов расчета были получены зависимости амплитуд вторых гармоник поперечно-горизонтальной, вертикальной и бортовой качки от частоты  $\omega_2$ , которые приведены на графиках 5-10. Амплитуды вторых гармоник представлены в безразмерном виде:

$$\bar{\eta}_-^{(2)} = \frac{\eta_-^{(2)} B/2}{a_{\eta_1} a_{\omega_2}}; \quad \bar{\zeta}_-^{(2)} = \frac{\zeta_-^{(2)} B/2}{a_{\zeta_1} a_{\omega_2}}; \quad \bar{\theta}_-^{(2)} = \frac{\theta_-^{(2)} (B/2)^2}{a_{\theta_1} a_{\omega_2}} \quad (6)$$

При равенстве частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , амплитуды должны выполнять следующие условия  $\bar{\eta}_-^{(2)}(\omega_1 - \omega_2) \rightarrow \infty$ ;

$$\bar{\zeta}_-^{(2)}(\omega_1 - \omega_2) = 2\bar{\zeta}_C^{(2)}(2\omega_2); \quad \text{где}$$

$$\bar{\theta}_-^{(2)}(\omega_1 - \omega_2) = 2\bar{\theta}_C^{(2)}(2\omega_2) \quad (7)$$

$\bar{\zeta}_C^{(2)}, \bar{\theta}_C^{(2)}$  - безразмерные амплитуды вертикальной и бортовой качки, обусловленные влиянием нелинейных постоянных вертикальных сил и моментов.

В целях проверки условия (7) амплитуды вторых гармоник вертикальной и бортовой качки, обусловленные разностью частот приведены для всех вариантов расчетов в сравнении с удвоенными значениями постоянных амплитуд  $\bar{\zeta}_C^{(2)}, \bar{\theta}_C^{(2)}$ , обусловленных влиянием нелинейных постоянных сил [3]. Из приведенных на рис.5-9 результатов сравнений видно, что при всех вариантах сочетаний частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$  в случае их равенства выполняются условия (7) для всех судов.

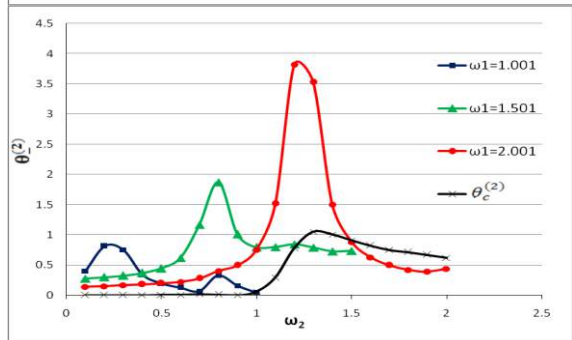
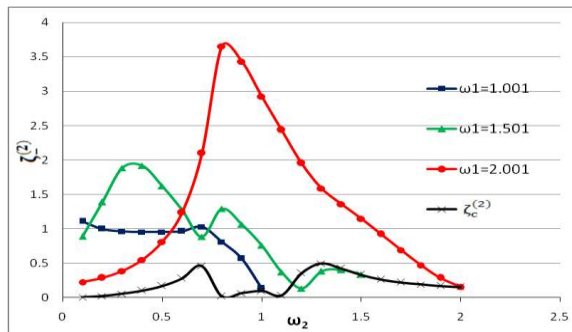


Рис.5 Амплитудно-частотные характеристики вторых гармоник вертикальной и бортовой качки, обусловленных разностью частот для танкера Баскунчак

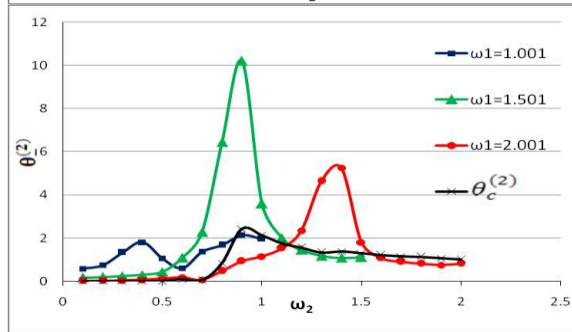
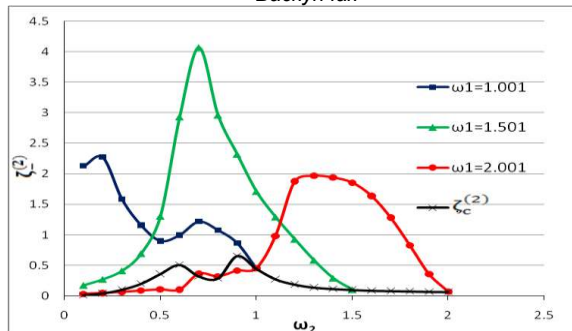
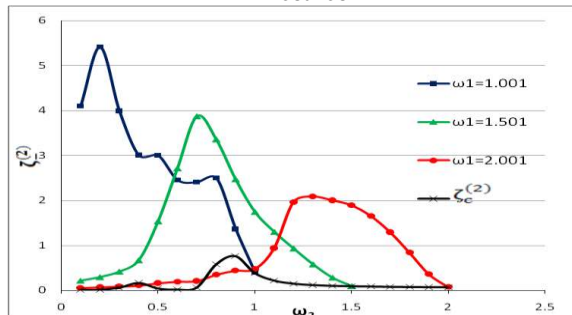


Рис.6 Амплитудно-частотные характеристики вторых гармоник вертикальной и бортовой качки, обусловленных разностью частот для лесовоза Николай Новиков





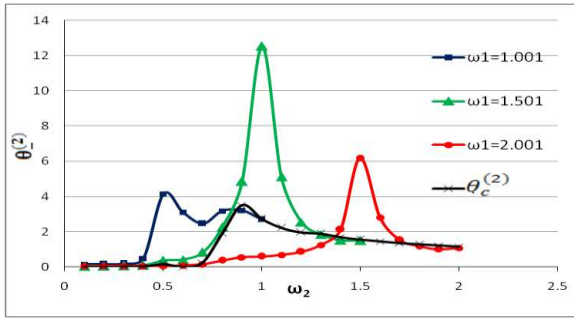


Рис.7 Амплитудно-частотные характеристики вторых гармоник вертикальной и бортовой качки, обусловленных разностью частот для балкера Капитан Панфилов

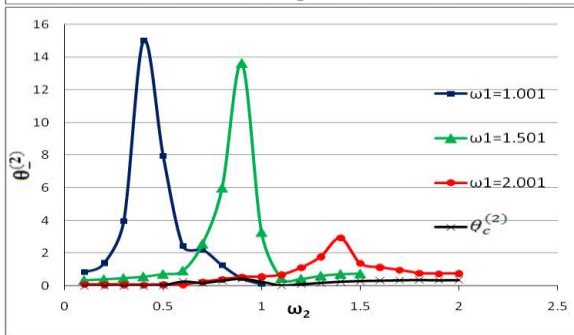
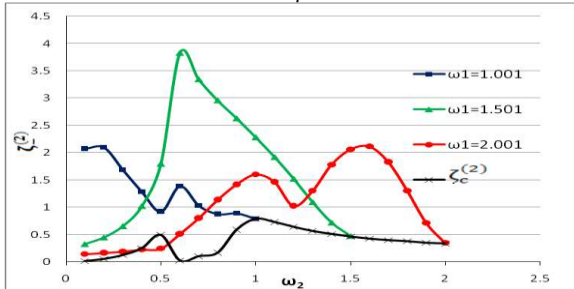


Рис.8 Амплитудно-частотные характеристики вторых гармоник вертикальной и бортовой качки, обусловленных разностью частот для контейнеровоза Художник Сарьян

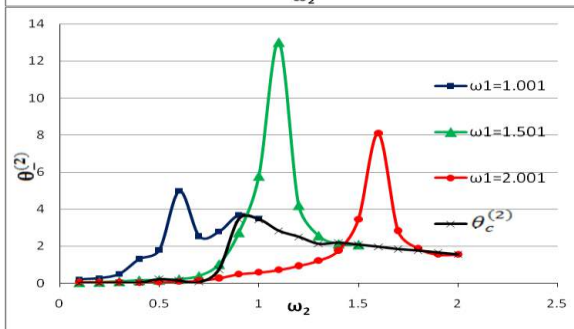
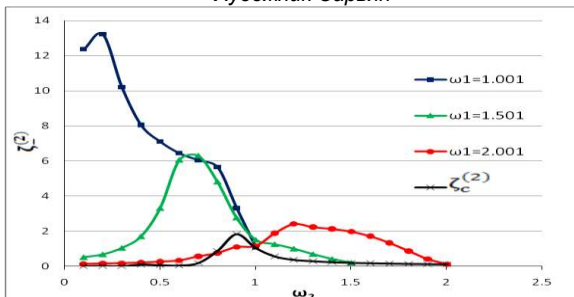


Рис.9 Амплитудно-частотные характеристики вторых гармоник вертикальной и бортовой качки, обусловленных разностью частот для сухогруза Новгород

Анализ результатов расчетов амплитудно-частотных характеристик вторых гармоник вертикальной качки, обусловленных разностью частот, показывает, что зависимости  $\zeta_{-}^{(2)} = f(\omega_2)$  имеют резонансы при всех трех вариантах расчета в случае когда  $\omega_1 - \omega_2 = \omega_{\zeta}$ . Так, для балкера Капитан Панфилов при  $\omega_1=1.001$  резонанс имеет место когда  $\omega_2=0.2$ , при  $\omega_1=1.501$  когда  $\omega_2=0.7$  и при  $\omega_1=2.001$  когда  $\omega_2=1.2$ . Легко видеть, что во всех трех случаях разность  $\omega_1 - \omega_2$  составляет 0.8, что совпадает со значением собственной частоты вертикальной качки  $\omega_{\zeta}$  данного судна (рис.7). При значении разности  $\omega_1 - \omega_2 = 0.8$  наблюдаются резонансы вертикальной качки и для других судов: лесовоз Николай Новиков (рис.6), сухогруз Новгород (рис.9).

При сочетании частот  $\omega_1=1.001$  и  $0.1 < \omega_2 < 1.$ , а также  $\omega_1=1.501$  и  $0.1 < \omega_2 < 1.5$ , безразмерные амплитуды  $\zeta_{-}^{(2)}$  в зоне резонанса могут достигать больших значений. Например, для сухогруза Новгород при сочетании  $\omega_1=1.001$  и  $0.1 < \omega_2 < 1.$ , максимальные значения  $\zeta_{-}^{(2)}$  равны 13. При сочетании частот  $\omega_1=1.501$  и  $0.1 < \omega_2 < 1.5$  для большинства судов в зоне резонанса значения безразмерных амплитуд  $\zeta_{-}^{(2)}$  не превышают 7.

Указанные значения амплитуд вторых гармоник  $\zeta_{-}^{(2)}$  во много раз больше значений постоянных амплитуд  $2\zeta_c^{(2)}$  и значений амплитуд вертикальной качки  $\zeta_{+}^{(2)}$ , обусловленных суммой частот. Так, при сочетании частот  $\omega_1=1.001$  и  $\omega_2=0.5$  для контейнеровоза Художник Сарьян амплитуды  $\zeta_{-}^{(2)}$  в 5 раз больше амплитуд  $\zeta_{+}^{(2)}$ , для лесовоза Николай Новиков при  $\omega_1=1.001$  и  $\omega_2=0.7$  - в 4 раза.

При сочетании частот  $\omega_1=1.501$  и  $0.1 < \omega_2 < 1.5$  значения амплитуд, обусловленных разностью частот  $\zeta_{-}^{(2)}$  многократно превышают значения амплитуд, обусловленных суммой частот  $\zeta_{+}^{(2)}$  для всех судов.

Большие безразмерные значения амплитуд  $\zeta_{-}^{(2)}$  связаны непосредственно с решением дифференциального уравнения (1). Действительно, амплитуды  $\zeta_{-}^{(2)}$  и  $\zeta_{+}^{(2)}$  определяются на основании следующих выражений:

$$\zeta_{-}^{(2)} = \sqrt{\frac{(\text{Re } F_{V-}^{(2)})^2 + (\text{Im } F_{V-}^{(2)})^2}{((M + \lambda_{33-}^{(2)}) (\omega_1 - \omega_2)^2 - \rho g S)^2 + (\omega_1 - \omega_2)^2 \mu_{33-}^{(2)}}} \quad (8)$$

$$\zeta_{+}^{(2)} = \sqrt{\frac{(\text{Re } F_{V+}^{(2)})^2 + (\text{Im } F_{V+}^{(2)})^2}{((M + \lambda_{33+}^{(2)}) (\omega_1 + \omega_2)^2 - \rho g S)^2 + (\omega_1 + \omega_2)^2 \mu_{33+}^{(2)}}} \quad (9)$$

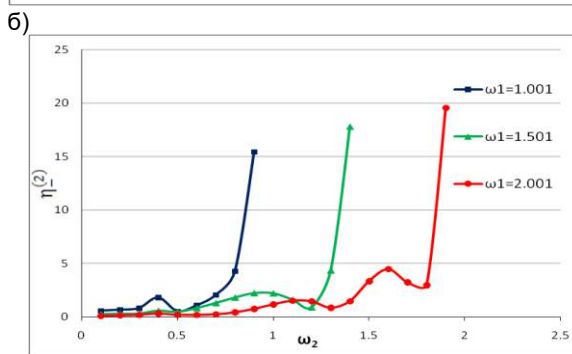
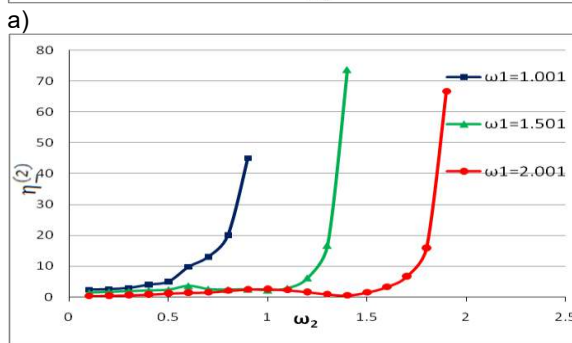
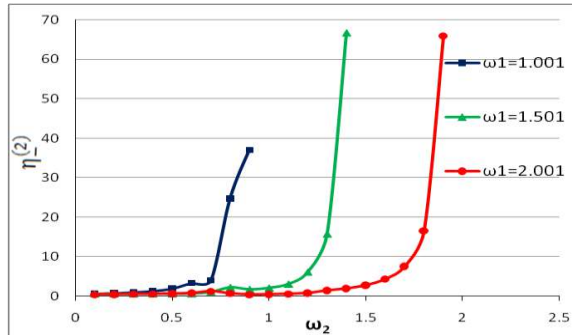
Нелинейные вертикальные силы  $\bar{F}_{V-}^{(2)}$  и  $\bar{F}_{V+}^{(2)}$ , как было отмечено выше, могут иметь равные величины. Однако, знаменатель выражения (8) намного меньше знаменателя выражения (9), что и является причиной многократного увеличения  $\zeta_{-}^{(2)}$  по сравнению с  $\zeta_{+}^{(2)}$

При третьем варианте расчета, когда  $\omega_1=2.001$  и  $\omega_2$  изменяется в пределах от 0.1 до 2 безразмерные резонансные амплитуды вертикальной качки  $\zeta_{-}^{(2)}$  не превышают значения 4. При изменении  $\omega_2$  от 0.1 до 1 значения  $\zeta_{-}^{(2)}$  могут быть соизмеримы со значениями  $2\zeta_{c}^{(2)}$  (рис.6,7,9). При равенстве частот  $\omega_1 = \omega_2 = 2$  значения безразмерных амплитуд  $\zeta_{-}^{(2)}$  могут быть одной величины с амплитудами вертикальной качки, обусловленными суммой частот  $\zeta_{+}^{(2)}$  или меньше их (рис.3,6). На всем остальном диапазоне частот, когда  $0.1 < \omega_2 < 2$  значения  $\zeta_{-}^{(2)}$  во много раз больше  $\zeta_{+}^{(2)}$  также как и при первых двух вариантах расчета.

Для зависимостей безразмерных амплитуд вторых гармоник бортовой качки, обусловленных разностью частот от второй частоты также характерно наличие резонансных режимов при выполнении равенства  $\omega_1 - \omega_2 = \omega_0$ . Так, для контейнеровоза Художник Сарьян резонансы имеют место при сочетании частот:  $\omega_1=1.001, \omega_2=0.4$ ;  $\omega_1=1.501, \omega_2=0.9$  и  $\omega_1=2.001, \omega_2=1.4$  (рис.8). Видно, что во всех случаях разность частот  $\omega_1 - \omega_2 = 0.6$ , что совпадает со значением собственной частоты бортовой качки  $\omega_0$  (рис.10). Для сухогруза Новгород все три резонанса имеют место когда  $\omega_1 - \omega_2 = \omega_0 = 0.4$  (рис.8,9).

Безразмерные значения амплитуд вторых гармоник  $\bar{\theta}_{-}^{(2)}$ , также как и в случае вертикальной качки, достигают больших значений, во много раз превышающих соответствующие значения безразмерных амплитуд  $\bar{\theta}_{+}^{(2)}$ , обусловленных суммой частот. Многократное увеличение амплитуд вторых гармоник  $\bar{\theta}_{-}^{(2)}$  по сравнению с  $\bar{\theta}_{+}^{(2)}$  связано прежде всего с влиянием величины разности частот при решении системы дифференциальных уравнений, аналогично ранее рассмотренному случаю вертикальной качки.

При сочетании частот  $\omega_1=1.001$  и  $\omega_2$ , изменяющейся в пределах от 0.1 до 1 значения безразмерных амплитуд  $\bar{\theta}_{-}^{(2)}$  несоизмеримо больше значений амплитуд  $2\bar{\theta}_{c}^{(2)}$ , которые в данном диапазоне частот имеют практически нулевые значения. Однако, при втором и третьем варианте расчета при определенных сочетаниях частот имеет место равенство амплитуд  $\bar{\theta}_{-}^{(2)}$  и  $2\bar{\theta}_{c}^{(2)}$ . Например, такое равенство имеет место для лесовоза Николай Новиков и балкера Капитан Панфилов при сочетании частот бихроматического волнения  $\omega_1=1.501, \omega_2=1.3$  (рис.6,7). Для сухогруза Новгород -при  $\omega_1=2.001, \omega_2=1.4$  и  $\omega_2=1.8$  (рис.9).



В) Рис.10 Амплитудно-частотные характеристики вторых гармоник поперечно-горизонтальной качки, обусловленных разностью частот для танкера Баскунчак (А), теплохода Любовь Орлова (Б) и танкера Мир(В)

На рис.10 приведены результаты расчетов амплитуд вторых гармоник поперечно-горизонтальной качки, обусловленной разностью частот для трех судов: танкер Баскунчак, теплоход Любовь Орлова и танкер Мир. Решение дифференциального уравнения изолированной нелинейной поперечно-горизонтальной качки, обусловленной разностью частот, имеет вид:

$$\eta_{-}^{(2)} = \sqrt{\frac{(\text{Re } F_{H-}^{(2)})^2 + (\text{Im } F_{H-}^{(2)})^2}{((M + \lambda_{22-}^{(2)}) (\omega_1 - \omega_2)^2)^2 + (\omega_1 - \omega_2)^2 \mu_{22-}^{(2)}}} \quad (10)$$

Из выражения (10) видно, что при равенстве частот и  $\omega_1 - \omega_2 = 0$  всегда амплитуды  $\eta_{-}^{(2)} \rightarrow \infty$ . При решении системы дифференциальных уравнений поперечно-горизонтальной и бортовой качки (1) амплитуды поперечно-горизонтальной качки также стремятся к бесконечности при  $\omega_1 \rightarrow \omega_2$ , что и показано на рис.10. При сочетании частот  $\omega_1=1.001, \omega_2 < 0.7$ ,  $\omega_1=1.501, \omega_2 < 1.1$  и  $\omega_1=2.001, \omega_2 < 1.7$  безразмерные амплитуды поперечно-горизонтальной качки могут быть соизмеримы с амплитудами, обусловленными суммой частот.

**Заключение**

Таким образом, проведенный анализ показал, что

- 1) амплитуды вторых гармоник вертикальной и бортовой качки, обусловленные суммой частот имеют наибольшие значения при сочетании частот бихроматического волнения когда  $\omega_1 < \omega_2$ . В этом случае имеют место резонансы, когда  $\omega_1 + \omega_2 = \omega_0$  и  $\omega_1 + \omega_2 = \omega_\zeta$

- 2) амплитуды вторых гармоник вертикальной и бортовой качки, обусловленные разностью частот имеют резонансы когда  $\omega_1 - \omega_2 = \omega_0$  и  $\omega_1 - \omega_2 = \omega_\zeta$  соответственн. Их значения многократно превышают значения амплитуд, обусловленных суммой частот, что связано с влиянием величины разности частот при решении соответствующих дифференциальных уравнений.

**Литература:**

1. Семенова В.Ю., КиавТхура(2017) Определение нелинейных сил второго порядка, обусловленных суммой частот, возникающих при качке судов на бихроматическом волнении. Морские интеллектуальные технологии, N4(38) Т.1, стр.32-45
2. Семенова В.Ю., КиавТхура (2018) Определение нелинейных сил второго порядка, обусловленных разностью частот, возникающих при качке судов на бихроматическом волнении ... Морские интеллектуальные технологии, № 2(40), Т.1 2018 стр 31-40
3. Семенова В.Ю. "Разработка метода расчета нелинейной качки судов". Дисс. на соискание уч. степени д.т.н. СПбГМТУ 2005г.

**References**

1. Semenova V.Yu., KiavTkhura(2017) Opredelenie nelineynykh sil vtorogo poryadka, obuslov-lennykh summoy chastot, vznikayushchikh pri kachke sudov na bikhromaticheskom volne-nii. Morskie intellektual'nye tekhnologii, N4(38) Т.1, str.32-45
2. Semenova V.Yu., KiavTkhura (2018) Opredelenie nelineynykh sil vtorogo poryadka, obu-slovlennykh raznost'yu chastot, vznikayushchikh pri kachke sudov na bikhromaticheskom vol-nenii ... Morskie intellektual'nye tekhnologii, № 2(40), Т.1 2018 str 31-40
3. Semenova V.Yu. "Razrabotka metoda rascheta nelineynoy kachki sudov". Diss. na soiskanie uch. stepeni d.t.n. SPbGMTU 2005g.

УДК 629.12.001.2

## ВЫБОР ФОРМЫ КОРПУСА АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО НАДВОДНОГО АППАРАТА С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

**Аким Владимирович Лавриненко**

Магистрант кафедры гидроаэромеханики и морской акустики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: akimlav@icloud.com

**Елена Валерьевна Ермолаева**

Магистрант кафедры гидроаэромеханики и морской акустики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: elena.ermolaeva.smtu@yandex.ru

**Максим Олегович Франк**

Магистрант кафедры проектирования судов  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: frankmaks95@mail.ru

**Кирилл Дмитриевич Овчинников**

Ассистент кафедры проектирования судов  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: ovchinnikov\_kd@mail.ru

**Никита Владимирович Тряскин**

Кандидат технических наук  
Старший преподаватель кафедры гидроаэромеханики и морской акустики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: nikita.tryaskin@smtu.ru

### Аннотация

В работе представлен выбор оптимальных обводов корпусов автономного необитаемого надводного аппарата катамаранного типа с помощью современных средств вычислительной гидродинамики. У современных надводных аппаратов большая часть бортовой энергии тратится на перемещение, поэтому выбор оптимальных обводов с точки зрения ходовых характеристик может серьезно повлиять на показатели автономности объекта. В рамках проведенного исследования рассмотрено применение трех типов обводов для надводного аппарата: классические корабельные, торпедообразные и упрощенные (на основе формы корпуса Виглей). Для выполнения расчетов использовался программный комплекс вычислительной гидродинамики OpenFOAM, применение которого было верифицировано путем численного моделирования обтекания корпуса DTMB 5415. Результаты расчетов показали, что численное моделирование позволяет с хорошей точностью определять сопротивление движению морских объектов в широком диапазоне скоростей. По результатам численного моделирования обтекания корпусов трех типов обводов были получены зависимости сопротивления от скорости хода и коэффициента полного сопротивления от числа Фруда по водоизмещению. Анализируя полученные зависимости, было заключено, что классические корабельные обводы с прямым форштевнем, транцевой кормой и большим кормовым подзором для установки движительно-рулевого комплекса обладают наилучшими ходовыми характеристиками по сравнению с торпедообразными и упрощенными обводами.

**Ключевые слова:** CFD, численное моделирование, автономный необитаемый надводный аппарат, катамаран, сопротивление.

## SELECTION OF AN AUTONOMOUS UNMANNED SURFACE VEHICLE BODY SHAPE BY USING MODERN MEANS OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

**Akim V. Lavrinenko**

Student in the master's programme, Department of AeroHydromechanics and Marine Acoustics,  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: akimlav@icloud.com



**Elena V. Ermolaeva**

Student in the master's programme, Department of Aerohydrodynamics and Marine Acoustics,  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: elena.ermolaeva.smtu@yandex.ru

**Maksim O. Frank**

Master student of the Department of Ship Design  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: frankmaks95@mail.ru

**Kirill D. Ovchinnikov**

Assistant of the Department of Ship Design  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: ovchinnikov\_kd@mail.ru

**Nikita V. Tryaskin**

PhD in Engineering Science  
Senior Lecturer, Department of Aerohydrodynamics and Marine Acoustics,  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: nikita.tryaskin@smtu.ru

**Abstract**

The paper presents the choice of optimal structural shapes of an autonomous unmanned surface catamaran-type body using modern computational fluid dynamics. In modern surface vehicles, most of the onboard energy is spent on movement, so the choice of optimal structural shapes in terms of performance data can seriously affect the autonomy of the object. Within the framework of the study, the use of three types of structural shapes for a surface vehicle was considered: classic shipboard, torpedo-shaped and simplified (based on the shape of the Wigley body). To perform the calculations, the software complex of computational hydrodynamics OpenFOAM was used, the application of which was verified by numerical simulation of the DTMB 5415 body flow. The results of the calculations showed that numerical simulation allows determining with good accuracy the resistance to the movement of marine objects in a wide range of speeds. According to the results of numerical simulation of the bodies flow of three types of structural shapes, the dependencies of the resistance on the travel speed and the impedance coefficient on the Froude number by displacement were obtained. Analyzing the obtained dependencies, it was concluded that the classic ship structural shapes with a straight stem, a transom stern and a large after rake for the installation of a propulsion and steering complex have the best performance data compared to torpedo-shaped and simplified structural shapes.

**Keywords:** CFD, numerical simulation, autonomous unmanned surface vehicle, catamaran, resistance.

**Введение**

В настоящее время идет активное внедрение морских необитаемых аппаратов для выполнения всевозможных задач. Первое применение морские необитаемые аппараты нашли в военной сфере, а позднее были адаптированы и для решения широкого круга научных, исследовательских и прикладных задач, таких как мониторинг акваторий, спасательные операции, разработка месторождений полезных ископаемых и сейсморазведка [1].

Для успешного выполнения своей миссии надводный аппарат должен обладать достаточной автономностью, которая зависит от многих факторов. С одной стороны автономность обеспечивается увеличением количества аккумуляторных батарей, которая влечет за собой увеличение массы аппарата, с другой – рациональным использованием имеющейся энергии. Обычно надводные аппараты тратят большую часть своей энергии на передвижение, что означает, что выбор оптимального с точки зрения ходовых качеств корпуса играет важнейшую роль в тактико-эксплуатационных характеристиках объекта.

При разработке автономного необитаемого надводного аппарата катамаранного типа, предназначенного для выполнения осмотровых

работ и экологического мониторинга для внутренних водных путей, в рамках внутренней инициативной научно-исследовательской работы Санкт-Петербургского государственного морского технического университета было рассмотрено применение обводов трех типов: классических корабельных, торпедообразных и упрощенных (сделанных на основании корпуса Виглей). Торпедообразные обводы приняты на необитаемом надводном аппарате Sonobot компании Evologics [2], а упрощенные обводы – на аппарате Catarob компании Subsea Tech [3].

Каждая из рассматриваемых форм корпуса имеет свои преимущества и недостатки. Например, торпедообразные и упрощенные [4] обводы достаточно просты с технологической точки зрения, однако при этом остро стоит вопрос с размещением движительно-рулевого комплекса.

В рамках настоящей работы произведены расчеты сопротивления надводного аппарата катамаранного типа трех различных типов обводов для выбора наилучшего варианта с точки зрения ходовых качеств. Расчеты производились с помощью численного моделирования обтекания корпусов в современном пакете вычислительной гидродинамики OpenFOAM [5].

**1. Численное моделирование обтекания корпуса**

Для численного моделирования обтекания корпуса в современном пакете вычислительной гидромеханики OpenFOAM используются уравнения Навье-Стокса для течения вязкой несжимаемой жидкости, осредненные по методу Рейнольдса, и уравнение неразрывности. Для моделирования свободной поверхности раздела «воздух – вода» используется модифицированная версия метода объема жидкости. Для моделирования турбулентности используется двухпараметрическая универсальная модель k- $\omega$  SST [6, 7, 8].

Для выполнения расчетов используется стандартный решатель комплекса OpenFOAM *interDyMFoam*, моделирующий поток двухфазной жидкости (воздух – вода) и работающий с динамически изменяемыми расчетными областями.

Для создания расчетных областей – сеток – используются внутренние утилиты комплекса OpenFOAM *blockMesh*, *topoSet* и *snappyHexMesh*.

**2. Верификация расчетного метода**

Для верификации расчетного метода моделировалось обтекание модели DTMB 5415 (корабль класса Арлей Бёрк, ВМС США) на трех скоростях хода, соответствующих числам Фруда по длине  $Fr = 0,140$ ,  $Fr = 0,281$  и  $Fr = 0,412$ .

Модель DTMB 5415 представлена в двух вариантах исполнения: голый корпус и корпус со скуловыми килями (рисунок 1). Для расчета сопротивления использовалась модель с голым корпусом.



Рис. 1. Модель DTMB 5415: сверху – голый корпус, снизу – корпус со скуловыми килями

При вычислениях модель имела две степени свободы – вертикальные и килевые колебания. Характеристики модели следующие: длина между перпендикулярами  $L_{pp} = 3,048$  м; ширина  $B = 0,409$  м; осадка  $T = 0,132$  м; водоизмещение  $D = 83,5$  кг; аппликата центра тяжести  $Z_g = 0,163$  м; момент инерции относительно продольной оси  $J_{yy} = 1,915$  кг·м<sup>2</sup>.

Результаты экспериментального исследования модели DTMB 5415 представлены в работе [9].

Для выполнения моделирования была создана полная расчетная область без условия симметрии со следующими характеристиками: количество ячеек ~ 3,75 млн, максимальный коэффициент пропорциональности ~ 78, максимальный

коэффициент закрученности ~ 3,6, средняя неортогональность ~ 4.

Результаты численного моделирования расчета сопротивления корпуса DTMB 5415 представлены в таблице 1. В таблице 1 введены следующие обозначения:  $Fr$  – число Фруда по длине;  $v$  – скорость, м/с; EFD – полное сопротивление по результатам экспериментального исследования, Н; CFD – полное сопротивление по результатам численного моделирования, Н; *abs tol* – абсолютная погрешность, Н; *rel tol* – относительная погрешность, %.

Таблица 1

**Результаты расчета полного сопротивления модели DTMB 5415**

Fr	v	EFD	CFD	abs tol	rel tol
0,140	0,765	1,79	1,71	0,08	4,8 %
0,281	1,536	7,43	7,35	0,08	1,1 %
0,412	2,253	23,36	23,32	0,04	0,2 %

Согласно данным, представленным в таблице 1, численное моделирование позволяет с хорошей точностью определять сопротивление движению морских объектов в широком диапазоне скоростей.

**3. Численное моделирование обтекания корпусов надводного аппарата**

Для выполнения расчетов трех типов обводов автономного необитаемого надводного аппарата были построены трехмерные модели, представленные на рисунке 2. Разработанные корпуса имеют одинаковые значения водоизмещения  $D = 42$  кг и габаритной длины  $L = 1,40$  м.



Рис. 2. Трехмерные модели исследуемых корпусов: сверху – классические корабельные обводы, посередине – торпедообразные обводы, снизу – упрощенные обводы

Расстояние между диаметрными плоскостями корпусов принято равным  $b = 0,80$  м.

Численное моделирование обтекания корпусов производилось для скоростей хода в диапазоне от 0,5 до 3,0 м/с.

Для выполнения моделирования были созданы расчетные области с условием симметрии по диаметральной плоскости судна со следующими характеристиками: количество ячеек ~ 1,7 млн, максимальный коэффициент пропорциональности ~ 67,5, максимальный коэффициент закрученности ~ 3,5, средняя неортогональность ~ 6.

По результатам численного моделирования были получены зависимости сопротивления от скорости хода и коэффициента сопротивления от числа Фруда

по водоизмещению, представленные на рисунках 3 и 4 соответственно.

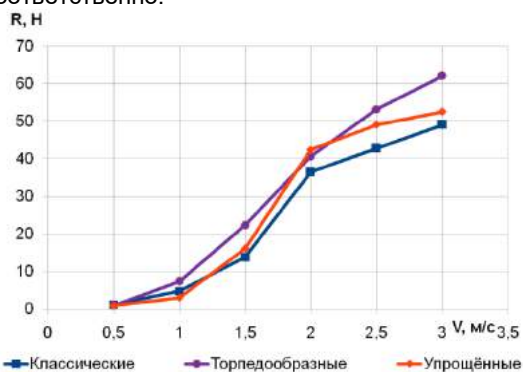


Рис. 3. Зависимость сопротивления от скорости хода

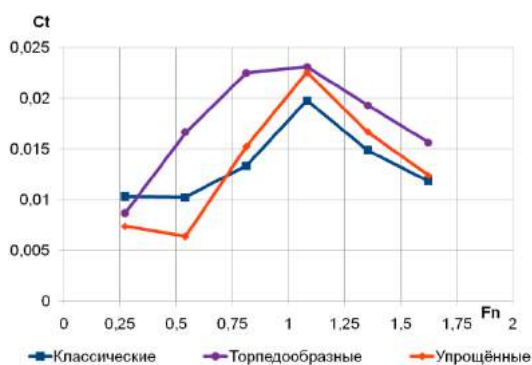


Рис. 4. Зависимость коэффициента полного сопротивления от числа Фруда по водоизмещению

Анализируя данные, представленные на рисунках 3 и 4, можно сделать вывод о том, что классические корабельные обводы с прямым форштевнем, транцевой кормой и большим кормовым подзором для установки движительно-рулевого комплекса обладают наилучшими ходовыми характеристиками по сравнению с торпедообразными и упрощенными обводами.

На рисунке 5 представлены картины волнообразования трех типов корпусов при скорости хода 3 м/с. Согласно представленным данным торпедообразные обводы имеют наихудшие характеристики заливаемости при движении на тихой воде.

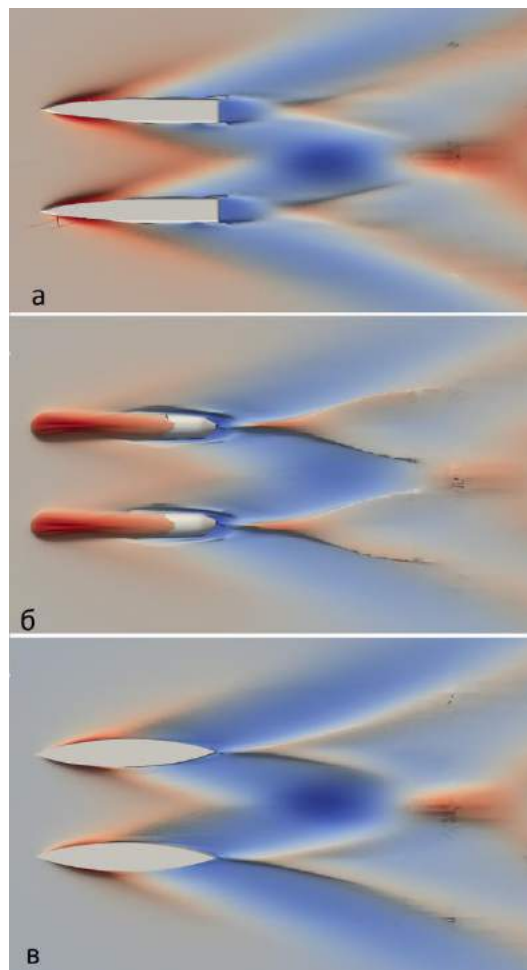


Рис. 5. Картины волнообразования рассматриваемых обводов при скорости хода 3 м/с: а – классические корабельные обводы, б – торпедообразные обводы, в – упрощенные обводы

По результатам проведенного исследования корпус с классическими корабельными обводами принимается в качестве основного и будет использован при создании полнатурной модели аппарата.

**Заключение**

В работе представлен выбор оптимальных обводов корпусов автономного необитаемого надводного аппарата катамаранного типа с помощью современных средств вычислительной гидродинамики.

У современных надводных аппаратов большая часть бортовой энергии тратится на перемещение, поэтому выбор оптимальных обводов с точки зрения ходовых характеристик может серьезно повлиять на показатели автономности объекта.

В рамках проведенного исследования рассмотрено применение трех типов обводов для надводного аппарата: классические корабельные, торпедообразные и упрощенные (на основе формы корпуса Виглей).

Для выполнения расчетов использовался программный комплекс вычислительной гидродинамики OpenFOAM, применение которого было верифицировано путем численного моделирования обтекания корпуса DTMB 5415.

Результаты расчетов показали, что численное моделирование позволяет с хорошей точностью определять сопротивление движению морских объектов в широком диапазоне скоростей.

По результатам численного моделирования обтекания корпусов трех типов обводов были получены зависимости сопротивления от скорости хода и коэффициента полного сопротивления от числа Фруда по водоизмещению. Анализируя полученные зависимости, было заключено, что классические корабельные обводы с прямым форштевнем, транцевой кормой и большим кормовым подзором для установки движительно-рулевого комплекса обладают наилучшими

ходовыми характеристиками по сравнению с торпедообразными и упрощенными обводами.

На основании полученных результатов корпус с классическими корабельными обводами принят в качестве основного и будет использован при создании полнонатурной модели аппарата.

Главными преимуществами численного моделирования являются скорость и стоимость. Для получения результатов достаточно иметь только теоретический чертеж исследуемого корпуса и его характеристики. При этом нет необходимости создавать физическую модель и проводить дорогостоящий эксперимент.

#### Литература

1. [https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned\\_surface\\_vehicle](https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_surface_vehicle) (13.11.2018)
2. <https://www.evologics.de/en/products/sonobot/index.html> (13.11.2018)
3. <https://www.subsea-tech.com/catarob/> (13.11.2018)
4. Ткаченко И. В., Тряскин Н. В. Численное моделирование качки судна на регулярном волнении. Морские Интеллектуальные Технологии. № 3 (21) 2013.
5. <http://openfoam.org> (13.11.2018).
6. Бесядовский А.Р. Численные методы в гидроаэромеханике: Учеб. пособие. СПбГМТУ; СПб., 2018.
7. Ткаченко И.В. Современные теории турбулентности: учеб. пособие. Под. ред. д-ра техн. наук, проф. А.Ш. Ачкинадзе. – СПбГМТУ. – СПб., 2010. – 87 с.
8. Ткаченко И.В. Современные методы решения задач гидродинамики: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2014. – 59 с.
9. Gui, L., Longo, J., and Stern, F., (2001), "Towing Tank PIV Measurement System, Data and Uncertainty Assessment for DTMB Model 5512," Experiments in Fluids, Vol. 31, pp. 336-346.

#### References

1. [https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned\\_surface\\_vehicle](https://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_surface_vehicle) (13.11.2018)
2. <https://www.evologics.de/en/products/sonobot/index.html> (13.11.2018)
3. <https://www.subsea-tech.com/catarob/> (13.11.2018)
4. Tkachenko I.V., Tryaskin N.V. Chislennoe modelirovanie kachki sudna na regulyarnom volnenii [Simulation of the rolling of ship on the regular wave]. Marine intellectual technologies. № 3 (21) 2013 (in Russian).
5. <http://openfoam.org> (13.11.2018)
6. Besyadovskiy A.R. Chislennyye metody v gidroaeromekhanike [Numerical methods in hydro and aeromechanics]. Textbook. SMTU of SPb, SPb, 2018 (in Russian).
7. Tkachenko I.V. Sovremennyye teorii turbulentnosti [Modern turbulence theories]. Textbook. SMTU of SPb, SPb, 2010 (in Russian).
8. Tkachenko I.V. Sovremennyye metody resheniya zadach gidrodinamiki [Modern methods of fluid dynamics task calculations]. Textbook. SMTU of SPb, SPb, 2014 (in Russian).
9. Gui, L., Longo, J., and Stern, F., (2001), "Towing Tank PIV Measurement System, Data and Uncertainty Assessment for DTMB Model 5512," Experiments in Fluids, Vol. 31, pp. 336-346.

УДК 539.4

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ПОДСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛОКАЛЬНЫХ ФОРМ ОТКАЗА КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Владимир Александрович Коршунов**

доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: korshunov@corp.smtu.ru

**Дмитрий Александрович Пономарев**

ассистент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: dmitriy.smtu@gmail.com

**Александр Александрович Родионов**

профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: rodionovsmk@yandex.ru

### Аннотация

В настоящей работе исследуются методы диакоптики применительно к математическим моделям метода конечных элементов, позволяющие снизить ресурсоемкость задач с локальными особенностями с помощью процедур подмоделирования. Показано, что современные процедуры подмоделирования ведут свое начало от метода суперэлементов, который реализовывал подструктурный анализ локально нелинейных статических задач без дополнительных допущений в многоуровневой иерархической форме. Отмечено, что для динамических задач метод суперэлементов и подструктурный анализ может быть реализован только с помощью дополнительных допущений и, как следствие, с использованием уточняющих итераций. Рассмотрено «сильное» и «слабое» взаимодействие подмоделей в расчетной модели всей задачи.

Для исследования локальных форм прогрессирующего разрушения разработан алгоритм подструктурного анализа, реализующий одну из форм слабого взаимодействия с двухсторонней связью. Разработана расчетная модель всей конструкции из композиционных материалов с деформирующейся в условиях внешней среды. Для локальной области построена детальная конечно-элементная модель. Выполнен анализ поведения локальной области с учетом послышной деградации свойств материала. Получена кривая несущей способности с характерными точками инициализации повреждений.

**Ключевые слова:** подмодель, суперэлемент, метод конечных элементов, подструктурный анализ, критерий разрушения, композиционный материал

## DEVELOPMENT OF SUBSTRUCTURAL ANALYSIS METHODS FOR RESEARCHES OF LOCAL FORMS OF FAILURES OF HULL STRUCTURES FROM POLYMER COMPOSITIONAL MATERIALS

**Vladimir A. Korshunov**

Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: korshunov@corp.smtu.ru

**Dmitry A. Ponomarev**

Assistant, St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: dmitriy.smtu@gmail.com

**Aleksandr A. Rodionov**

Professor, St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: rodionovsmk@yandex.ru

### Abstract

This paper investigates the methods of diakoptics as applied to mathematical models of the finite element method, which make it possible to reduce the resource intensity of problems with local characteristics using sub-modeling procedures. It is shown that modern sub-modeling procedures originate from the super-element method, which implemented a sub-structural analysis of locally non-linear static problems without additional assumptions in a multilevel form of a hierarchy.. It is noted that for dynamic problems, the method of super-elements and sub-structural analysis can be implemented only with the help of additional assumptions and, as a result, with the use of specifying iterations. The

“strong” and “weak” interaction of sub-models in the computational model of the entire problem is considered.

For the study of local forms of progressive destruction, an algorithm for sub-structural analysis has been developed that implements one of the forms of weak interaction with two-way communication. A computational model of the entire structure made of composite materials with a deformation under environmental conditions has been developed. For the local area, a detailed finite element model is built. The analysis of the behavior of the local area is performed taking into account the layer-by-layer degradation of material properties. The load bearing curve with distinguished points of damage initialization is obtained.

**Keywords:** sub-model, super element, finite element method, sub-structural analysis, fracture criterion, composite material

**Введение**

Нагрузки, действующие на конструкции корпуса и вызывающие его деформирование, определяются условиями поведения объекта в целом при его взаимодействии с внешней средой: водным и воздушным пространством. В то же время в большинстве случаев отказы в работе конструкции носят локальный характер и инициализуются в малых зонах в окрестностях «горячих точек». В связи с этим исследования прочностных характеристик конструкций должно проводиться одновременно как на уровне всей конструкции, так и на уровне локальных зон. Выявление и детальное исследование локальных форм повреждений с помощью современных численных методов, в частности метода конечных элементов требует генерации мелкой сетки дискретизации, сопоставимой с моделируемыми объемами инициализации дефектов в материале конструкции. Здесь возникает проблема размерности задачи, от способа разрешения которой зависит сама возможность получения корректного результата.

**1. Диакоптика в моделях метода конечных элементов**

Одним из наиболее общих подходов к решению больших и сложных задач является подход, опирающийся на диакоптику – методы расчленения [1]. Применительно к методу конечных элементов это подход реализуется с помощью процедуры метода суперэлементов [2]-[4]. Расчетная модель конструкции разбивается на несколько подмоделей. Для каждой подмодели узлы и узловые параметры разделяются на внутренние (обозначаемые нижним индексом *a*) и внешние (обозначаемые нижним индексом *b*). Внешние узлы или граничные служат для соединения смежных подмоделей в расчетную модель всей конструкции. Для подмоделей смежных с исследуемой подмоделью с «горячими точками» из уравнения равновесия исключаются внутренние узловые параметры в результате чего они редуцируются в суперэлемент, свойства которого описываются граничными узловыми параметрами. Уравнение состояния некоторой *i*-ой подмодели, состоящей из конечных элементов, представляются в матричной форме:

$$[K]_i \{q\}_i = \{P\}_i \tag{1.1}$$

где  $[K]_i$  - матрица жесткости,  $\{q\}_i$  - вектор узловых параметров,  $\{P\}_i$  - вектор узловых нагрузок *i*-ой подмодели.

При выделении в *i*-ой подмодели внутренних и граничных узловых параметров уравнение состояния подмодели представляется в блочной форме:

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix}_i \begin{Bmatrix} q_a \\ q_b \end{Bmatrix}_i = \begin{Bmatrix} P_a \\ P_b \end{Bmatrix}_i \tag{1.2}$$

или

$$[K_{aa}]_i \{q_a\}_i + [K_{ab}]_i \{q_b\}_i = \{P_a\}_i \tag{1.3}$$

$$[K_{ba}]_i \{q_a\}_i + [K_{bb}]_i \{q_b\}_i = \{P_b\}_i \tag{1.4}$$

Из уравнения (1.3) выражаются внутренние узловые параметры

$$\{q_a\}_i = [K_{aa}]_i^{-1} \{P_a\}_i - [K_{aa}]_i^{-1} [K_{ab}]_i \{q_b\}_i, \tag{1.5}$$

подстановка которых в уравнение (1.4) дает редуцированное уравнение состояния *i*-го суперэлемента

$$[K_b]_i \{q_b\}_i = \{R_b\}_i \tag{1.6}$$

Здесь обозначено:

$[K_b]_i$  - матрица жесткости суперэлемента

$$[K_b]_i = [K_{bb}]_i - [K_{ba}]_i [K_{aa}]_i^{-1} [K_{ab}]_i \tag{1.7}$$

$\{R_b\}_i$  - вектор узловых нагрузок суперэлемента

$$\{R_b\}_i = \{P_b\}_i - [K_{ba}]_i [K_{aa}]_i^{-1} \{P_a\}_i. \tag{1.8}$$

С математических позиций МСЭ представляет собой блочный метод исключения Гаусса, а непосредственная дискретизация расчетной модели, выполняемая в несколько иерархических уровней, обладает большой наглядностью и напоминает процесс сборки конструкции из деталей, секций и блоков. МСЭ не вносит дополнительных допущений по сравнению с использованием прямой процедуры МКЭ, и никакой потери точности расчета не возникает. При локализованной нелинейности вся линейная часть модели объединяется в суперэлемент, взаимодействующий только с нелинейной подмоделью. Порядок разрешающей системы нелинейных уравнений равен порядку матрицы жесткости нелинейной подмодели, а влияние линейной части сводится к линейному граничному условию. Понятно, что эффективность такого способа решения зависит, главным образом, от степени локализации нелинейностей [3].

В динамических задачах узловые параметры и нагрузки зависят от времени и в уравнениях

состояния появляется матрица масс. Уравнение состояния  $i$ -ой динамической подмодели, состоящей из конечных элементов, представляется в матричной форме:

$$[M]_i \{\ddot{q}(t)\}_i + [K]_i \{q(t)\}_i = \{P(t)\}_i \quad (1.9)$$

где  $[M]_i$  - матрица масс,  $\{\ddot{q}(t)\}_i$  - вектор узловых ускорений,  $\{q(t)\}_i$  - вектор узловых перемещений,  $\{P(t)\}_i$  - вектор узловых нагрузок  $i$ -ой подмодели.

Уравнение состояния  $i$ -ой подмодели при выделении в внутренних и граничных узловых параметров в блочной форме:

$$\begin{bmatrix} M_{aa} & M_{ab} \\ M_{ba} & M_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}(t)_a \\ \ddot{q}(t)_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q(t)_a \\ q(t)_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P(t)_a \\ P(t)_b \end{Bmatrix} \quad (1.10)$$

или

$$[M_{aa}]_i \{\ddot{q}(t)_a\}_i + [M_{ab}]_i \{\ddot{q}(t)_b\}_i + [K_{aa}]_i \{q(t)_a\}_i + [K_{ab}]_i \{q(t)_b\}_i = \{P(t)_a\}_i \quad (1.11)$$

$$[M_{ba}]_i \{\ddot{q}(t)_a\}_i + [M_{bb}]_i \{\ddot{q}(t)_b\}_i + [K_{ba}]_i \{q(t)_a\}_i + [K_{bb}]_i \{q(t)_b\}_i = \{P(t)_b\}_i \quad (1.12)$$

Решение динамических задач с помощью процедуры статического редуцирования разрешающей системы уравнений возможно только с использованием дополнительной системы допущений, что снижает точность по сравнению с прямым расчетом по МКЭ [4][5] и требует дополнительных итераций согласования.

Но во многих случаях это остаётся единственным способом решения сложных задач и здесь появляются разнообразные процедуры, которые объединяются сложившимся термином – подмоделирование [6]. Подмоделирование предназначается для исследования локальной части модели с достаточно подробной сеткой конечных элементов. Решение, полученное из всей расчетной модели с грубой сеткой конечных элементов, интерполируется на границы локальной части. Взаимодействия между локальной частью и всей моделью может быть как односторонним, так и двусторонним. При одностороннем взаимодействии информация между подмоделями передается только в одном направлении: или от всей расчетной модели к локальной подмодели, или от локальной подмодели ко всей расчетной модели. Двустороннее взаимодействие предполагает передачу информации в обоих направлениях, оно может быть организовано как «сильное» или «слабое». Сильное взаимодействие предполагает совместное решение уравнений для локальной части и всей расчетной модели, в то время как слабое взаимодействие подразумевает раздельное решение локальной подмодели и всей расчетной модели с последующим итерационным согласованием решений.

## 2. Подмоделирование для анализа локальных форм отказа

Процедура подмоделирования реализована для исследования прогрессирующего разрушения материала в композиционных конструкциях корпуса судна, находящегося в динамических условиях нагружения [7],[8].

На первом этапе создается расчетная модель всей системы конструкции и внешней среды. Степень детализации конструкции обеспечивает выявление

по результатам расчетного анализа районов корпуса с повышенными значениями параметров напряженно-деформированного состояния.

Для выявленных районов используется более мелкая сетка конечных элементов, которая интегрируется в модифицированную расчетную модель всей конструкции. Здесь реализуется сильное двустороннее взаимодействие. По результатам расчета определены локальные области потенциально опасных районов, в которых возможна инициализация повреждения конструкции.

Для локальных областей генерируется такая мелкая сетка конечных элементов, что позволяет обнаружить все возможные формы разрушения или отказа сложной структуры композиционного материала.

При заданных законах изменения узловых перемещений граничных узлов, полученных из расчета модели всей конструкции, решается задача прогрессирующего разрушения материала в локальной области. В результате решения регистрируется зависимость жесткостных параметров локальной области относительно граничных узловых перемещений. Тем самым реализуется двустороннее взаимодействие всей расчетной модели с локальной областью. Локальная область нагружается заданными граничными перемещениями, полученными из расчета всей модели, а при прогрессирующем разрушении и деградации свойств материала в расчетную модель всей системы вводятся интегральные жесткостные параметры локальной области. Предлагаемый подход реализует слабое взаимодействие и требует выполнения итерационного уточнения.

## 3. Расчетная модель всей конструкции

Исследования параметров напряженно-деформированного состояния конструкции корпуса катамарана в экстремальных условиях эксплуатации на волнении, связано с необходимостью анализа возможных локальных повреждений отдельных связей, что реализуется с помощью многоэтапной процедуры подмоделирования.

На первом этапе создается общая расчетная модель конструкции корпуса катамарана при движении по водной поверхности в условиях волнения. Скорость движения катамарана 40 узл. высота волны 2 м, длина волны 1.4 длинны катамарана. Особенности моделирования взаимодействия конструкций корпуса катамарана с жидкостью в условиях волнения описано в работе [7].

Корпус катамарана изготовлен из полимерных композиционных материалов в виде трехслойных сэндвич панелей. Несущие слои, составляемые из пакетов монослоев, образуют наружную поверхность конструктивного элемента, а легкий наполнитель располагается между ними. Несущие слои изготавливаются на основе угле- и стеклотканей. В качестве наполнителя используется пенопласт ПВХ. Наполнитель воспринимает сдвиговые усилия и обеспечивает разнесение несущих слоев.

Расчетная модель корпуса катамарана включает в себя все конструктивные элементы в явном виде. Специально не моделировались клеевые соединения и приформовки. Для корпуса используются многослойные оболочечные элементы в формулировке Лагранжа с одной точкой



интегрирования на каждый слой. В качестве слоев оболочки определяются внешние несущие слои с приведенными характеристиками и среднего слоя –

заполнителя. Фрагмент расчетной модели всей конструкции корпуса катамарана представлен на рисунке 1.

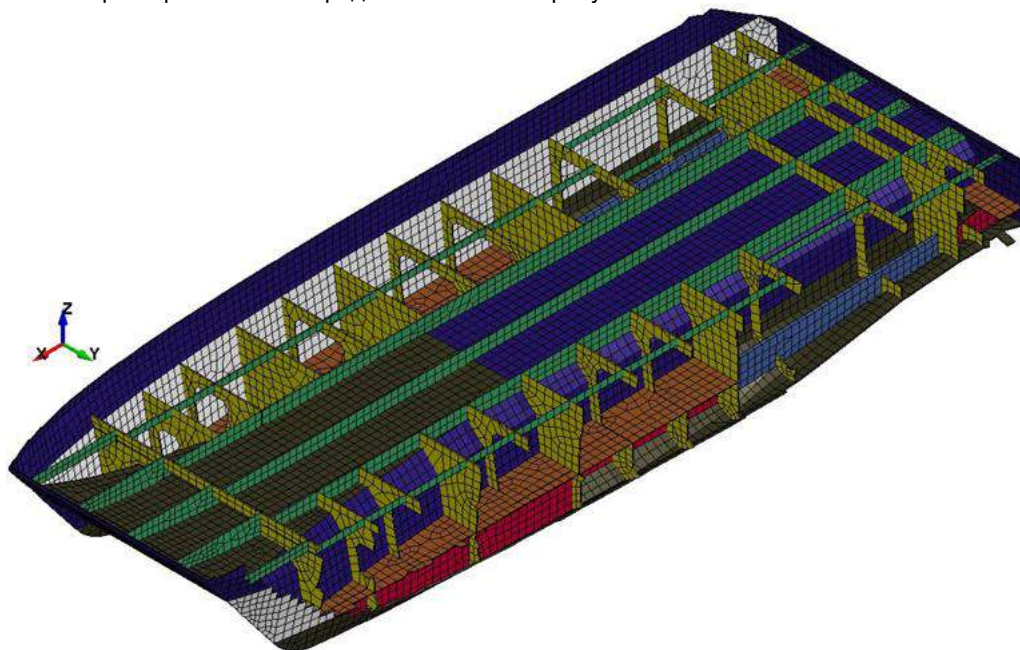


Рис. 1. Фрагмент расчетная модель корпуса катамарана, часть обшивки и надстройка не показаны

Расчетная модель всей конструкции корпуса катамарана служит целью выявления районов, потенциально опасных с позиций появления повреждений.

В результате анализа напряженно-деформированного состояния всей модели конструкции определен опасный район корпуса в носовой оконечности между шпангоутами 3 и 4.

Из решения общей задачи для граничных узлов опасного района выделены кинематические и силовые параметры взаимодействия с заданным законом изменения во времени. В результате расчетного анализа опасного района с мелкой сеткой конечных элементов определена связь, которая находится в самых жестких условиях нагружения. Этой связью является карлингс в районе соединения моста катамарана.

#### 4. Расчетная модель разрушаемого фрагмента

С тем чтобы отследить возможные формы отказа разработана подробная конечно-элементная модель карлингса с учетом всех особенностей конструкций, определяющих формы наступления предельных состояний (рис. 2). Слоистая структура несущих слоев моделировалась с помощью многослойных оболочечных конечных элементов с ортотропной упругопластической моделью материала. Создание расчетной сетки для несущих слоев учитывала расположение границ слоев ткани с направлением армирования (укладки). Принято допущение об «идеальном сцеплении слоев между собой». Несущие слои формируются по алгоритму, который включает в себя все основные этапы подготовки расчетной сетки, автоматическое формирование толщины несущих слоев за счет поэтапного задания монослоев в составе пакетов, что в свою очередь определило физические характеристики материала и

толщины для каждого элемента сетки. Заполнитель моделировался твердотельными элементами, с использованием кусочно-линейной упругопластической моделью материала. Разрушение монослоев оценивалось с помощью критериальной функции разрушения, согласно которой разрушение наступает при превышении функцией значения единицы для одного из слоев, входящих в пакет. Используемая математическая модель материала учитывала четыре механизма разрушения, в соответствии с критериями Чанг-Чанга [9] и Цзя-Ву [10]:

- разрушение волокон при растяжении

$$e_f^2 = \left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \beta \cdot \left(\frac{\tau_{12}}{S_C}\right) - 1;$$

- разрушение волокон при сжатии

$$e_c^2 = \left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2 - 1;$$

- разрушение матрицы при растяжении

$$e_f^2 = \left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \beta \cdot \left(\frac{\tau_{12}}{S_C}\right) - 1;$$

- разрушение матрицы при сжатии

$$e_{md}^2 = \left(\frac{\sigma_2}{Y_C \cdot Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_C}\right) + \frac{(Y_C - Y_T) \cdot \sigma_2}{Y_C \cdot Y_T} - 1.$$

где

$X_T$  - предел прочности при растяжении в продольном направлении (вдоль волокон);

$X_C$  - предел прочности при сжатии в продольном направлении;

$S_C$  - предел прочности при сдвиге;

$Y_C$  - предел прочности при сжатии в поперечном направлении;  
 $Y_T$  - предел прочности при растяжении в поперечном направлении;  
 $\beta$  - параметр, позволяющий учитывать влияние сдвиговых напряжений.

Распределение значений критериев разрушения по монослоям представлено на рисунках 3 и 4.

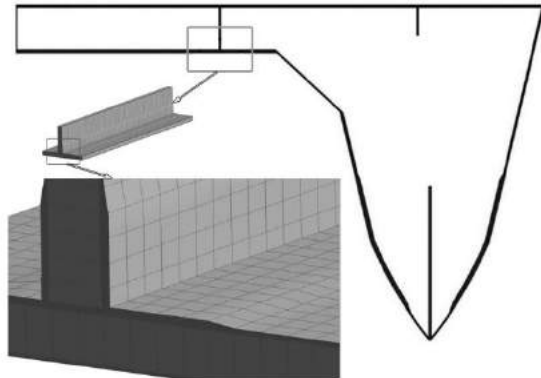


Рис. 2 Расчетная модель карлингса в районе соединения с мостом катамарана, учитывающая послойную структуру ПКМ и приформовку

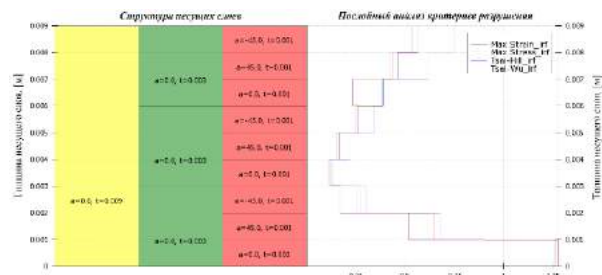


Рис. 3 Распределение критериев разрушения по среднему поперечному сечению монослойной структуры верхнего несущего слоя наружной обшивки

При достижении критерием разрушения предельного значения включался алгоритм деградации свойств материала. Тем самым изменялись и жесткостные характеристики локальной области. Учет обнаруженных изменений локальной области на уровне модели всей конструкции выполнялся приближенно. Поскольку на уровне общей модели использовались оболочечные конечные элементы то для них достаточно ограничиться двумя модулями нормальной упругости  $E_{11}$ ,  $E_{22}$ , модулем сдвига  $G_{12}$  и коэффициентом Пуассона  $\nu_{12}$ . Которые вычислялись из расчетных моделей локальной области при специальных граничных условиях, реализующих одноосное растяжение вдоль каждой из ортогональных осей, и сдвиг в плоскости пластины.

Откорректированные характеристики материала учитывались в расчетной модели всей конструкции для получения обновленного решения, которое использовалось для получения откорректированных значений кинематических и силовых параметров локальной модели. Затем локальная модель

подвергалась новому циклу расчетного анализа прогрессирующего разрушения.

В результате нескольких циклов итерационного процесса, в котором задействованы общая расчетная модель конструкции и локальная модель карлингса с учетом деградации свой полимерного композиционного материала получена кривая нагружения разрушаемого конструктивного элемента, представленная на рисунке 5.

**Заключение**

В работе предложена процедура подструктурного анализа для исследования локальных процессов деградации свойств материала силовых корпусных конструкций. Отмечено, что все современные процедуры подмоделирования в расчетных моделях метода конечных элементов обязаны методу суперэлементов, который реализовывал подструктурный анализ локально нелинейных статических задач без дополнительных допущений в многоуровневой иерархической форме и обеспечивал существенную эффективность расчетов.

Показано, что для динамических задач метод суперэлементов и подструктурный анализ может быть реализован только с помощью дополнительных допущений и как следствие с использованием уточняющих итераций.

Один из вариантов метода подмоделирования реализован применительно к задаче исследования несущей способности конструкции корпуса высокоскоростного судна катамарана в экстремальных условиях эксплуатации на волнении.

Разработана расчетная модель всей системы конструкции и внешней среды. Степень детализации конструкции обеспечила выявление по результатам расчетного анализа районов корпуса с повышенными значениями параметров напряженно-деформированного состояния.

Для локальной области сгенерирована детальная конечно-элементная модель большой подробности с мелкой сеткой, что позволило обнаружить все возможные формы разрушения или отказа сложной структуры композиционного материала.

При заданных законах изменения узловых перемещений граничных узлов, полученных из расчета модели всей конструкции, решена задача прогрессирующего разрушения материала в локальной области. При достижении критерием разрушения предельного значения включался алгоритм деградации свойств материала.

Учет обнаруженных изменений локальной области на уровне модели всей конструкции выполнялся приближенно с помощью итерационного уточнения.

Полученная картина деформирования локального района наиболее нагруженного фрагмента конструкции с фиксацией моментов инициализации повреждения, достижения максимального сопротивления и его полного разрушения подтверждает эффективность предлагаемой процедуры подмоделирования в задачах динамического нагружения сложных конструкций.

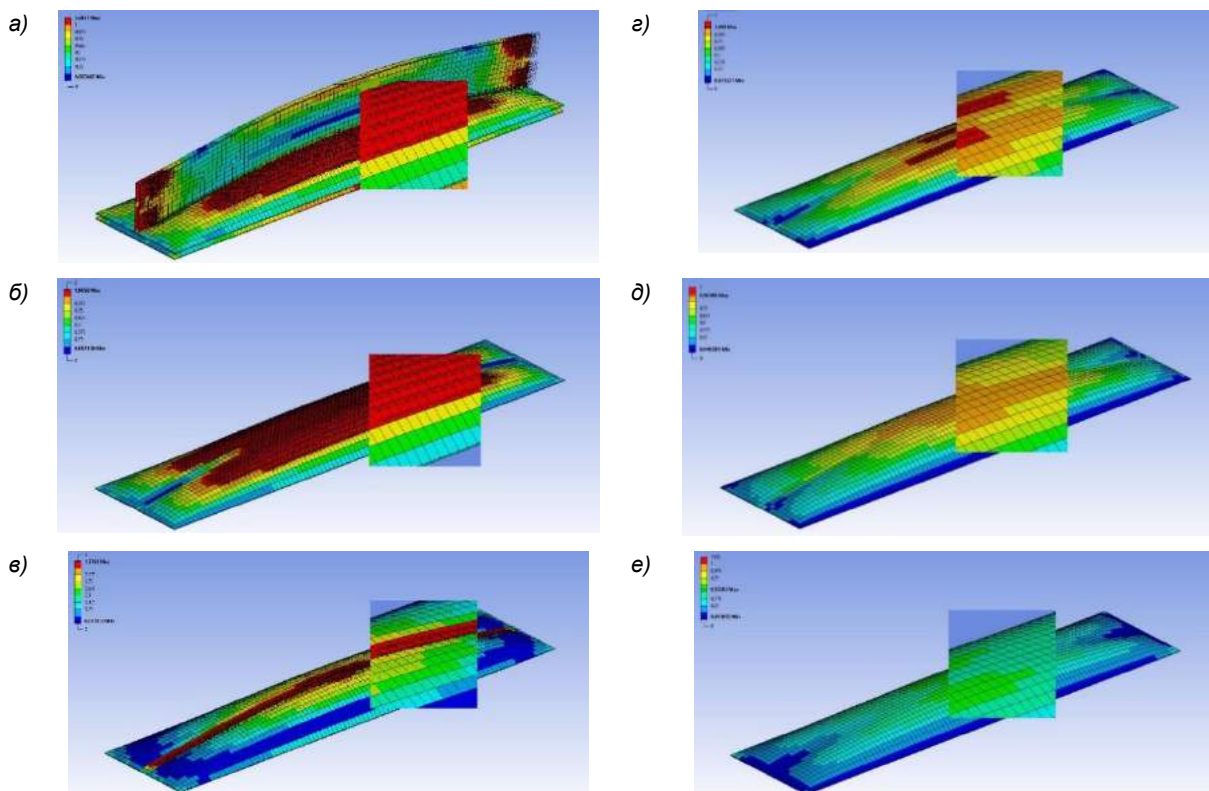


Рис. 4 Распределение критериев разрушения по монослям структуре верхнего несущего слоя: а) по всей модели карлингса; б) по моносляю 1, в) по моносляю 2, г) по моносляю 3, д) по моносляю 4, е) по моносляю 5

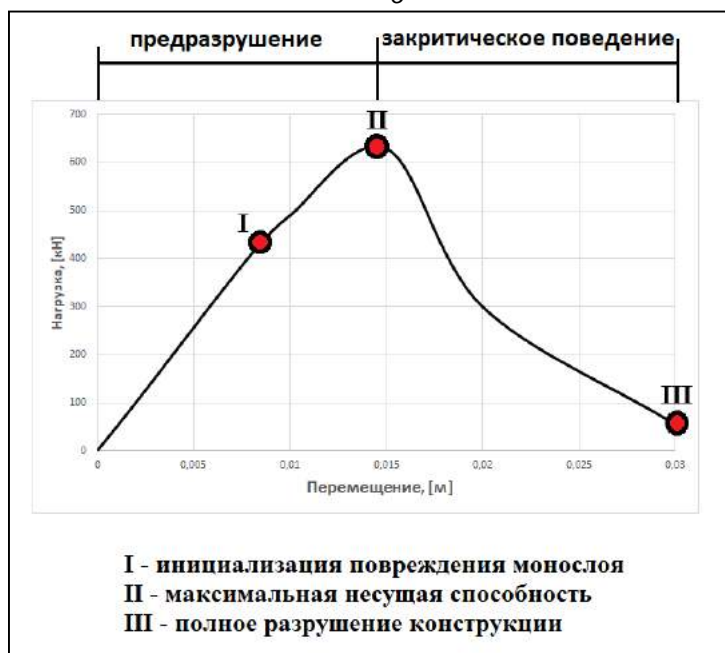


Рис. 5 Кривая нагружения для расчетной модели карлингса в рассматриваемом районе

**Литература**

1. Крон Г. Исследование сложных систем по частям (диакоптика). М.: Наука, 1972. - 544 с.
2. Метод суперэлементов в расчете прочности судовых конструкций/ В. А. Постнов, С. А. Дмитриев, Б. К. Елтышев, А. А. Родионов. – Судостроение, 1975, №11.
3. Постнов В. А., Родионов А. А., Ценков М. Ц. Метод суперэлементов в линейных и нелинейных задачах. – В кн.: Метод конечных элементов в строительной механике. – Горький: Изд-во ГГУ, 1975.
4. Постнов В. А., Дмитриев С. А., Елтышев Б. К., Родионов А. А. Метод суперэлементов в расчетах инженерных сооружений. – Л.: Судостроение, 1979.

5. Родионов А.А. Математические методы проектирования оптимальных конструкций судового корпуса. – Л. Судостроение, 1990.
6. Labeas G. N., Belesis S. D., Diamantakos I., Tserpes K. I. Adaptive Progressive Damage Modeling for Large-scale Composite Structures. *International Journal of DAMAGE MECHANICS*, Vol. 21—April 2012. 1056-7895/12/03 0441–22 DOI: 10.1177/1056789511400928
7. Пономарев Д.А. Современные методы решения задачи взаимодействия конструкций с водо-воздушной средой. *Морские Интеллектуальные Технологии*, Научный журнал №3 (37) Т. 3 2017, стр. 30-40.
8. Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Моделирование взаимодействия деформируемой конструкции корпуса катамарана с жидкостью в условиях морского волнения. В сб. «Труды Крыловского государственного научного центра». Специальный вып.2 2018. СПб 2018.с.104-113.
9. Chang F. K., Chang K. Y. A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentration, *Journal of Composite Materials*, Vol. – 21, 1987, p. 834-855.
10. Tsai S. W. and Wu E. M. A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials*, Vol. 5, 1971, p. 58–80

#### References

1. Kron G. *Issledovanie slozhnyh sistem po chastyam (diakoptika)*. M.: Nauka, 1972. - 544 s.
2. Metod superelementov v raschete prochnosti sudovyh konstrukcij/ V. A. Postnov, S. A. Dmitriev, B. K. Eltyshv, A. A. Rodionov. – Судостроение, 1975, №11.
3. Postnov V. A., Rodionov A. A., Cenkov M. C. Metod superelementov v linejnyh i nelinej-nyh zadachah. – V kn.: Metod konechnykh ehlementov v stroitel'noj mekhanike. – Gor'kij: Izd-vo GGU, 1975.
4. Postnov V. A., Dmitriev S. A., Eltyshv B. K., Rodionov A. A. Metod superelementov v raschetah inzhenernyh sooruzhenij. – L.: Sudostroenie, 1979.
5. Rodionov A.A. Matematicheskie metody proektirovaniya optimal'nyh konstrukcij sudovo-go korpusa. – L. Sudostroenie, 1990. Постнов В. А., Дмитриев С. А., Елтышев Б. К., Родионов А. А. Метод суперэлементов в расчетах инженерных сооружений. – Л.: Судостроение, 1979.
6. Labeas G. N., Belesis S. D., Diamantakos I., Tserpes K. I. Adaptive Progressive Damage Modeling for Large-scale Composite Structures. *International Journal of DAMAGE MECHANICS*, Vol. 21—April 2012. 1056-7895/12/03 0441–22 DOI: 10.1177/1056789511400928
7. Ponomarev D.A. Sovremennye metody resheniya zadachi vzaimodejstviya konstrukcij s vo-do-vozdushnoj sredoj. *Morskie Intellektual'nye Tekhnologii*, Nauchnyj zhurnal №3 (37) Т. 3 2017, стр. 30-40.
8. Korshunov V.A., Ponomarev D.A., Rodionov A.A. Modelirovanie vzaimodejstviya defor-miruemoj konstrukcii korpusa katamarana s zhidkost'yu v usloviyah morskogo volneniya. V sb. «Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra». Special'nyj vyp.2 2018. SPb 2018.s.104-113.
9. Chang F. K., Chang K. Y. A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentration, *Journal of Composite Materials*, Vol. – 21, 1987, p. 834-855.
10. Tsai S. W. and Wu E. M. A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials*, Vol. 5, 1971, p. 58–80

УДК 629.12

## МЕТОД РАСЧЕТА ТЯНУЩЕЙ ВИНТО-РУЛЕВОЙ КОЛОНКИ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

**Алексей Юрьевич Яковлев**

доктор технических наук, доцент,

профессор кафедры Гидроаэромеханики и морской акустики,

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

заместитель начальника отделения Ходкости кораблей и судов – начальник отдела управления проектами

Федеральное государственное унитарное предприятие «Крыловский государственный научный центр»

196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44

e-mail: 10\_otd@ksrc.ru

### Аннотация

Для прогнозирования характеристик судна и движителей в условиях реальной эксплуатации необходимо уметь оценивать силы и моменты действующие на винто-рулевого колонки (ВРК) и гребном винте (ГВ) в широком диапазоне поступей и углов поворота ВРК. Подобные оценки в настоящее время осуществляются расчетным путем с использованием CFD-методов или по результатам модельных испытаний. Оба указанных подхода требуют больших временных затрат, что затрудняет их применение для решения практических задач.

В работе предложен упрощенный метод расчета характеристик тянущей ВРК в широком диапазоне режимов работы, основанный на использовании струйной теории гребного винта, полуэмпирической модели отрывного обтекания для расчета сил на корпусе ВРК и метода коэффициентов взаимодействия для учета взаимодействия ГВ и корпуса ВРК. Разработанный расчетный метод был верифицирован путем сопоставления результатов расчетов с экспериментальными данными.

В работе представлены результаты применения разработанного расчетного метода для оценки сил и моментов на ВРК при маневрировании судна, в том числе при экстренном торможении, выполняемом путем поворота ВРК на 180 градусов. Дополнительно, на основе этих результатов, проведен расчет распределения напряжений в лопастях ГВ, работающего в составе ВРК и выявлены его характерные особенности.

В заключении по работе делается вывод о целесообразности использования разработанного расчетного метода для решения практических задач, связанных с оценкой гидродинамических нагрузок на движителе.

**Ключевые слова:** винто-рулевого колонка, гребной винт, расчет, непроектные режимы, маневрирование судна, экстренное торможение судна, прочность лопастей, силы и моменты

## CALCULATION METHOD OF THE STEERABLE THRUSTER AND ITS USE TO SOLVE PRACTICAL TASKS

**Alexey Yu. Yakovlev**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor,

Professor, Department of Hydroelectric Mechanics and Marine Acoustics,

St. Petersburg State Marine Technical University

190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3

Deputy Head of the Ship and Vessel Propulsion Division - Head of Project Management Department

Federal State Unitary Enterprise "Krylov State Research Center"

196158, St. Petersburg, Moskovskoye shosse, 44

e-mail: 10\_otd@ksrc.ru

### Abstract

To predict the characteristics of the vessel and propulsion units in actual operation, it is necessary to be able to estimate the forces and moments acting on the steerable thruster and the propeller in a wide range of advance ratios and angles of rotation of the steerable thruster. Such estimates are currently carried out by calculation using CFD-methods or according to the results of model tests. Both of these approaches require large span time, which makes it difficult to use them for solving practical problems.

The paper proposes a simplified method for calculating the characteristics of a the steerable thruster in a wide range of operating modes, based on the use of the propeller jet theory, a semi-empirical model of Reynolds numbers to calculate forces on the steerable thruster body and the interaction coefficients method to account for the interaction between the propeller and the steerable thruster body. The developed calculation method was verified by comparing the results of calculations with experimental data.

The paper presents the results of applying the developed computational method for evaluating forces and moments on the steerable thruster while maneuvering the vessel, including during emergency braking, performed by turning the steerable thruster by 180 degrees. Additionally, based on these results,



the stress distribution in the propeller blades, operating as part of the steerable thruster, was calculated and its specific features were revealed.

In conclusion, the work concludes that it is expedient to use the developed computational method for solving practical problems related to the estimation of hydrodynamic loads on a propulsion unit.

**Keywords:** steerable thruster, propeller, calculation, non-design modes, ship maneuvering, emergency braking of the ship, blades strength, forces and moments

**Введение**

Для успешного проектирования судна необходимо знать характеристики движителя, в том числе и на непроектных режимах работы. Для гребных винтов (ГВ) эти характеристики обычно определяются в результате модельного эксперимента. Для поворотных колонок проведение регулярных экспериментальных исследований оказывается значительно более трудоемким и дорогостоящим и по этой причине имеет в основном исследовательскую направленность [1], [2], [3]. Тем более, что в отличие от ГВ, ВРК представляют собой не только движитель, но и средство управления. Практика показывает, что в ходе эксплуатации возможна работа движителя в большем диапазоне углов схода потока (от 0 до 360 градусов) и поступей.

Необходимость определения характеристик движителя на непроектных режимах существенно усложняет вычислительную задачу. Дело в том, что гидродинамические процессы на подобных режимах работы движителя обычно имеют сугубо отрывной характер и для их полноценного численного моделирования желательно применять LES-методы [4], которые чрезвычайно трудоемки. Применение более простых CFD-моделей [5], ведет к снижению достоверности получаемых оценок, но все равно требует существенных временных затрат. В этой связи, наряду с мощными расчетными схемами развиваются упрощенные математические модели, основанные на эмпирических соотношениях и частично использующие результаты модельных испытаний [5], [6].

Примером практической задачи, в которой роль непроектных режимов работы движителя выходит на первый план, является маневрирование судна [7] и в особенности выполнение экстренного торможения. Упрощенному методу расчета экстренного торможения судна с помощью поворота колонок и определению сил действующих на ГВ и поворотной колонке в процессе реверса посвящена работа [6]. Представленный в настоящей работе метод [8] в отличие от [6] позволяет учесть одновременно изменение поступи и угла поворота колонки. Он опирается на результаты и закономерности, полученные на основе обработки данных экспериментальных исследований моделей поворотных колонок, что существенно повышает его точность.

**1. Основные положения расчетного метода**

Комплекс разработанных расчетных методов, моделирующих работу ВРК, включает в себя метод расчета поворотной колонки на режимах близких к проектному (реализован на основе методов ВЕМ и несущей поверхности) [9] и метод расчета поворотной колонки на произвольном режиме работы. Представленные методы разработаны для расчета ГВ в составе тянущей поворотной колонки.

Для случая толкающей поворотной колонки расчеты можно проводить, если известно поле за колонкой.

При исследовании полного диапазона режимов работы ВРК используется полуэмпирическая модель обтекания корпуса ВРК и расчете работы ГВ по струйной теории [8].

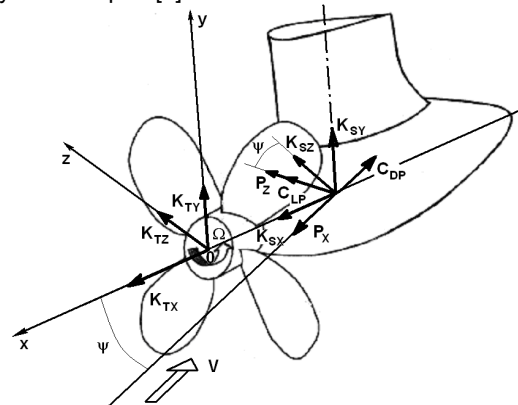


Рис. 1. Схема поворотной колонки и используемые системы координат.

Для представления характеристик поворотной колонки используются связанные с ней декартова и цилиндрическая системы координат (рис. 1). Поворот колонки относительно направления скорости набегающего потока V задается углом psi. В работе исследуются поворотные колонки тянущего типа, поэтому нулевое значение угла psi соответствует проектному положению винта впереди гондолы.

В качестве основного результата расчета выступают продольные и поперечные компоненты безразмерных силы K\_T и момента K\_Q на ГВ, силы на поворотной колонке K\_P, а так же суммарная сила K\_S, представленные в связанной с колонкой системе координат. В рамках работы силы отнесены к  $\rho n^2 D^4$ , а моменты к  $\rho n^2 D^5$ . Компоненты силы, ориентированные вдоль P\_X и поперек P\_Z направления набегающего потока, могут быть определены путем сложения проекций продольной K\_X и поперечной K\_Z компонент любой из этих сил.

$$\begin{aligned} P_X &= K_X \cdot \cos(\psi) - K_Z \cdot \sin(\psi) \\ P_Z &= K_X \cdot \sin(\psi) + K_Z \cdot \cos(\psi) \end{aligned} \quad (1)$$

**1.1. Расчет сил, действующих на гребном винте**

Поскольку использование вихревой теории для моделирования непроектных режимов неизбежно потребовало бы введения существенных допущений, а привлечение методов CFD привело бы к повышению трудоемкости, был разработан метод расчета, основанный на струйной теории гребного винта и ряде эмпирических соотношений, полученных из анализа экспериментальных данных. Этот метод [8] базируется на модификации известного метода Папмеля [10]. Аналогичный

подход за рубежом получил название ВЕМТ [5] и так же находит применение для расчета ВРК [5], [6].

В рамках разработанного метода, гидродинамические силы, создающие упор и крутящий момент винта, определяются для цилиндрических сечений лопасти. Величины этих сил зависят от угла атаки профиля и скорости его обтекания  $W_i$ . Скорость  $W_i$ , в свою очередь, определяется скоростью потока набегающего на лопасть ГВ  $V$  и скоростями, вызванными ГВ  $w$ . Радиальная компонента скорости в расчетах не учитывается. Осевая и тангенциальная компоненты скорости скошенного потока, набегающего на лопасть ГВ, представляются следующим образом

$$V_x = -V \cdot \cos\psi$$

$$V_\theta = -\Omega r - V \sin\psi \cdot \sin\left(\Omega t + \frac{2\pi}{Z} j + \theta\right) \quad (2)$$

где  $j = 0, 1, \dots, Z - 1$ ;  $V$  - скорость набегающего потока (рис. 1),  $\Omega$  - частота вращения ГВ,  $Z$  - число лопастей винта,  $t$  - время,  $\psi$  - угол скоса потока.

Вызванные скорости определяются, в соответствии с основными положениями струйной теории ГВ [11]. В этом случае предполагается, что струя сохраняет цилиндрическую форму, а от режима работы зависит шаг вихревых пелен. Данное предположение справедливо на всех режимах, кроме режима обратной струи, когда скорость набегающего потока и скорости, вызванные винтом, являются величинами одного порядка, но направлены в противоположные стороны. Для моделирования течения типа обратной струи введен специальный коэффициент, учитывающий ограниченную протяженность вихревой пелены. Этот коэффициент зависит от длины струи, определяемой согласно [12].

Следуя струйной теории ГВ [11] из треугольника скоростей можно получить следующее уравнение

$$\operatorname{ctg}(\varphi - \alpha) = \frac{V_\theta - w_\tau(\alpha)}{V_x + w_x(\alpha)} \quad (3)$$

где  $\varphi$  - шаговый угол сечения лопасти,  $w_x$   $w_\theta$  - компоненты скорости вызванной ГВ,  $\alpha$  - угол атаки профиля цилиндрического сечения лопасти.

Это нелинейное алгебраическое уравнение относительно неизвестной величины  $\alpha$ . Оно решается методом последовательных приближений.

Для получения силы и момента, действующих на винте, необходимо решить уравнение (3) для ряда цилиндрических сечений лопасти, задать  $C_Y$  и  $C_X$  и проинтегрировать полученные силы по радиусу.

Поскольку скос потока приводит к изменению скорости в зависимости от угла поворота лопасти (2), в результате будет происходить периодическое изменение действующих на ней сил. Для получения стационарных составляющих сил требуется произвести расчет сил для каждого угла поворота лопасти и только затем численно осреднить их по переменной  $\tau = \Omega t$  в интервале от нуля до  $2\pi$ . В результате такого осреднения, суммируя силы на отдельных лопастях, приходим к окончательным выражениям для коэффициентов упора и момента ГВ в свободной воде, в скошенном потоке.

$$K_{TX0} = \frac{ZJ^2}{4\pi} \int_{r_0}^1 \int_0^{2\pi} CW_i^2 [C_Y \cos\beta_i - C_X \sin\beta_i] dt dr \quad (4)$$

$$K_{Q0} = \frac{ZJ^2}{8\pi} \int_{r_0}^1 \int_0^{2\pi} CW_i^2 r [C_Y \sin\beta_i + C_X \cos\beta_i] dt dr$$

где  $r_0$  - радиус ступицы,  $\beta_i = \varphi - \alpha$ .

Аналогично вычисляются поперечные составляющие сил и моментов

Эффективность разработанного метода подтверждена сопоставлением результатов расчета с экспериментальными данными работы [13]. В этой работе приведены величины компонент силы и момента, полученные в результате испытаний ГВ для диапазона поступей от нуля до единицы и фиксированных углов скоса потока от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  (с шагом  $15^\circ$ ) Рассматривается четырехлопастной винт вагенингенской В-серии, с дисковым отношением  $A_E/A_0 = 0.7$ .

Ниже приведены результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных для продольной и поперечной сил на винте в системе координат, связанной с потоком (1), а также момента на оси винта. Поперечная компонента силы на винте в направлении оси  $Oy$  -  $K_{TY}$ , при скосе потока в плоскости поворота ГВ отсутствует.

Сопоставление показало, что согласование с экспериментом можно признать удовлетворяющим предъявляемым требованиям как при малых (рис. 2), так и при больших поступях (рис. 3).

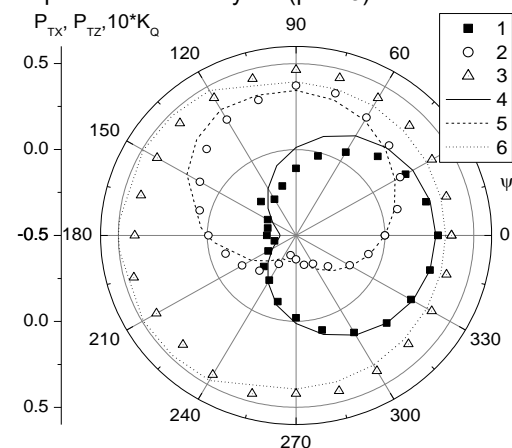


Рис. 2. Сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей компонент силы и момента на винте от угла скоса потока  $\psi$  ( $J=0.2$ ). Эксперимент: 1 -  $P_{TX}$ , 2 -  $P_{TY}$ , 3 -  $K_Q$ , расчет: 4 -  $P_{TX}$ , 5 -  $P_{TY}$ , 6 -  $K_Q$ .



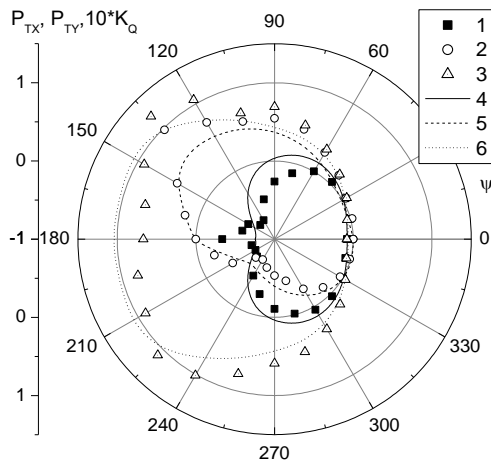


Рис. 3. Сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей компонент силы и момента на винте от угла скаса потока  $\psi$  ( $J=1.0$ ). Эксперимент: 1 –  $P_{Tx}$ , 2 –  $P_{Ty}$ , 3 –  $K_Q$ , расчет: 4 –  $P_{Tx}$ , 5 –  $P_{Ty}$ , 6 –  $K_Q$ .

1.2. Расчет сил на поворотной колонке без гребного винта

ВРК помимо ГВ включает неподвижные элементы, такие как стойка, гондола и возможно системы крыльев. На этих элементах так же возникают силы гидродинамической природы, которыми недопустимо пренебрегать. Эти силы, по аналогии с силами на корпусе судна, могут рассматриваться в отсутствие ГВ, с одновременным введением коэффициентов взаимодействия с ГВ.

Для расчета сил на колонке при малых углах перекадки, когда ее обтекание происходит безотрывно, можно использовать метод граничных элементов с соответствующими поправками на вязкость [9]. Однако поскольку диапазон таких углов не велик, основной интерес представляет оценка сил при отрывном обтекании колонки. Для расчета сил на этих режимах применяются соотношения, полученные в [8], на основе формулы Рэлея:

$$C_{XP} = \kappa \cdot C_N(\psi) \cdot \sin\psi + A(\psi, Re) \tag{5}$$

$$C_{YP} = \kappa \cdot C_N(\psi) \cdot \sin\psi + C_{Y90} \cdot \sin\psi$$

где коэффициент  $C_N$  определяется согласно [8],  $A$  – учитывает зависимость от числа Рейнольдса при ламинарном или турбулентном режимах обтекания и определяется по результатам модельных испытаний,  $C_{Y90}$  – поправка, учитывающая боковую силу, возникающую из-за несимметричности колонки в продольном направлении, коэффициент  $\kappa$  учитывает 3-х мерный характер отрывного обтекания,  $Re = \frac{V\sqrt{\Sigma}}{\nu}$ ,  $\Sigma$  – смоченная поверхность колонки.

В данном случае все коэффициенты сил получены отнесением соответствующих величин к  $\rho \frac{V^2}{2} \Sigma$ .

1.3. Расчет взаимодействия ГВ с поворотной колонкой

Моделирование взаимодействия гребного винта с корпусом судна традиционно осуществляется с помощью коэффициентов попутного потока  $w$  и засасывания  $t$ . Ранее было показано, что взаимодействие ГВ с поворотной колонкой можно

моделировать аналогичным образом [8]. Отличие будет состоять в том, что оба коэффициента будут зависеть не только от поступи, но и от угла поворота колонки.

$$w = w(J, \psi) \tag{6}$$

$$t = t(J, \psi)$$

Для получения зависимостей (6) были использованы экспериментальные данные для нескольких моделей движителей. Для соответствующих ГВ были выполнены расчеты сил и моментов. Коэффициенты  $w$  и  $t$  определялись таким образом, что бы обеспечить получение экспериментальных значений для поворотной колонки и ГВ в ее составе на основе расчетных данных.

Опираясь на полученные зависимости  $t$  и  $w$  можно выполнить расчет характеристик поворотной колонки. Поскольку при этом неявно предполагается, что влияние, оказываемое поворотной колонкой на ГВ и ГВ на поворотную колонку, слабо зависит от особенностей геометрии ГВ и колонки, то расчет будет наиболее точен для однотипных поворотных колонок.

Подобный подход к анализу взаимодействия ГВ с корпусом ВРК был независимо предложен в работе [14] и на примере испытаний одной ВРК с различными ГВ была подтверждена его эффективность.

1.4. Расчет сил и моментов на ВРК

Расчет сил на ВРК осуществляется следующим образом. В начале вычисляются силы и моменты на ГВ в свободной воде и характеристики колонки без ГВ. Далее, с использованием коэффициента  $w$ , производится пересчет расчетных кривых действия ГВ в свободной воде на случай его работы в составе колонки.

$$K_{TX} = K_{TX0}(J \cdot (1 - w), \psi) \tag{7}$$

$$K_Q = K_{Q0}(J \cdot (1 - w), \psi)$$

Затем с учетом коэффициентов  $w$  и  $t$  выполняется расчет сил на движителе в целом.

Пример расчета продольной силы  $P_{\Sigma X}$  на поворотной колонке и ее сопоставление с экспериментом для двух поступей приведен на рис. 4. Расчет проводился по изложенной выше методике, экспериментальные данные получены в результате модельных испытаний в ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. Проведенное сопоставление демонстрирует хорошую точность разработанного расчетного метода в рассматриваемом диапазоне режимов работы ГВ.

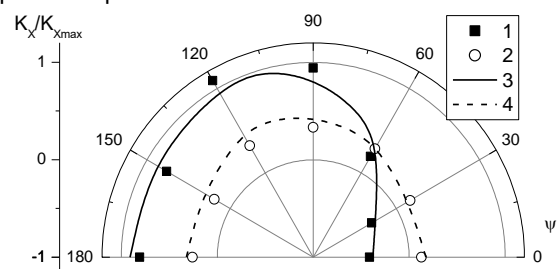


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные зависимости коэффициента продольной силы на поворотной колонке (отнесены к максимальной величине силы). Расчет: 1 –  $J=1.3$ , 2 –  $J=0.5$ , эксперимент: 3 –  $J=1.3$ , 4 –  $J=0.5$ .

**2. Использование метода расчета ВРК для решения практических задач**

Разработанный расчетный метод позволяет получать силовые характеристики ВРК и ГВ в широком диапазоне поступей и углов перекадки ВРК в сжатые сроки. При наличии результатов модельных испытаний ГВ или ВРК на прямом ходу достоверность прогноза повышается, но метод может работать и в их отсутствии. Таким образом, созданный расчетный метод может служить удобным инструментом для проведения различных расчетов, связанных с моделированием работы движителя в реальных условиях эксплуатации. К числу таких исследований относится расчет выполнения судном, оснащенных ВРК, различных маневров, и оценка возникающих при этом нагрузок на ВРК и ГВ. Ниже представлены примеры таких исследований.

**2.1. Выход судна на циркуляцию**

Непосредственный расчет маневрирования судна осуществляется с помощью метода представленного в [15]. Как показали расчеты, поворот ВРК на постоянный угол, приводит к следующей картине выхода судна на циркуляцию (рис. 5). Если сравнить результаты маневрирования при помощи ВРК с традиционным управлением с помощью руля, то можно констатировать, что в случае ВРК судно имеет значительно меньший относительный радиус циркуляции, что соответствует известным экспериментальным исследованиям [7].

Помимо сказанного, в качестве характерных особенностей маневрирования судна с помощью ВРК можно отметить [15] падение скорости установившегося движения на циркуляции.

Это в свою очередь находит отражение в изменении характеристик движителя: снижение поступи и рост упора при выполнении маневра с помощью ВРК происходят существенно интенсивнее. В особенности это заметно при малых углах перекадки.

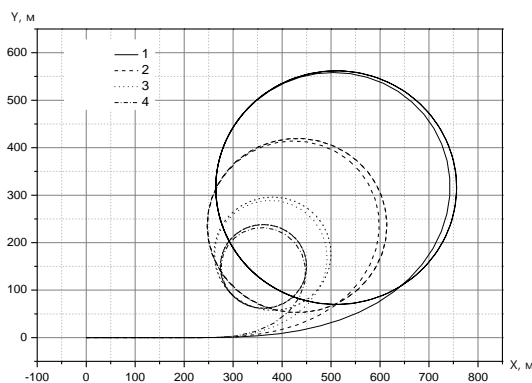


Рис. 5. Траектория движения судна при различных углах перекадки рулей. Тихая вода. Углы перекадки рулей: 1 - 50, 2 - 100, 3 - 200, 4 - 300.

**2.2. Расчет реверса судна путем поворота ВРК**

Одним из наиболее важных видов маневра является экстренное торможение судна [11]. Для судов оснащенных поворотными колонками появляется альтернативная возможность реверсирования – не традиционным изменением

направления вращения ГВ, а путем поворота колонки. Расчет этого маневра требует знания сил и моментов на ГВ и поворотной колонке в широком диапазоне поступей и углов поворота колонки, которые могут быть получены с помощью данного метода.

На рис. 6 приведена кривая соединяющая режимы работы движителя в порядке их прохождения судном при реверсе. Видно что диапазон этих режимов чрезвычайно велик. Проведение экспериментальных измерений сил и моментов на колонке для каждого проектируемого ГВ потребовало бы в данном случае весьма значительных временных и материальных затрат. По этой причине основным инструментом такой оценки стал расчетный метод.

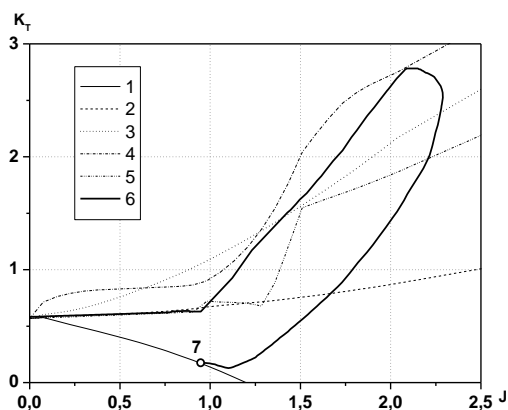


Рис. 6. Зависимость  $K_T$  от поступи и угла поворота колонки. Расчетные зависимости  $K_T$  при различных углах поворота: 1 –  $\psi=0^\circ$ , 2 –  $\psi=60^\circ$ , 3 –  $\psi=90^\circ$ , 4 –  $\psi=120^\circ$ , 5 –  $\psi=180^\circ$ . 6 – режимы проходимые в процессе реверсирования судна, 7 – точка начала торможения.

С другой стороны расчет сил и моментов на колонке и ГВ и последующий расчет реверса судна показали [16], что данный способ реверса принципиально отличается от традиционного. С одной стороны он оказывается эффективнее – то есть быстрее и значит безопаснее в экстренном случае. С другой нагрузки на лопасти ГВ при таком реверсировании могут оказаться слишком велики и следовательно они нуждаются в специальном исследовании в ходе проектирования ГВ.

**2.3. Оценка прочности лопастей гребного винта**

В соответствии с требованиями к прочности лопастей ГВ, расчеты прочности должны производиться на наиболее нагруженном режиме работы ГВ [17]. Как показали расчеты, этот режим в процессе реверса поворотом ВРК обычно имеет место при углах поворота ВРК порядка  $90^\circ$  (рис. 7). В этом случае лопасть ГВ работает в условиях нестационарного обтекания и сила на ней существенно меняется за оборот.

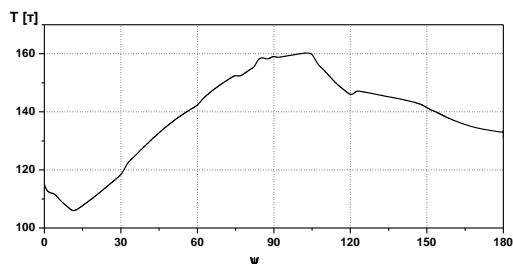


Рис. 7. Изменение силы на ГВ в процессе реверса путем поворота колонки.

Распределение нагрузки на лопасти ГВ в случае реверса путем поворота колонки оказывается иным, чем при традиционном реверсе. Пример распределения максимальных напряжений по радиусу лопасти ГВ для обоих случаев в обезразмеренном виде представлен на рис. 8. Как видно перераспределение нагрузки приводит к существенному изменению напряжений. В таких условиях представленный расчетный метод является незаменимым инструментом, позволяющим обеспечить необходимую прочность лопастей ГВ, работающих в составе поворотной колонки.

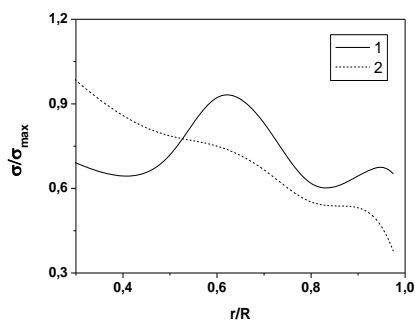


Рис. 8. Распределение максимальных нагрузок в лопасти ГВ по радиусу. 1 – при традиционном реверсе, 2 – при реверсе поворотом колонки.

### Заключение

Подводя итог, можно констатировать следующее:

- Разработанный упрощенный расчетный метод является быстрым и эффективным инструментом оценки сил на ВРК и ГВ во всем диапазоне режимов работы и углов поворота ВРК. Достаточная для практических задач точность получаемых оценок подтверждена сопоставлением с экспериментальными данными.
- Использование результатов модельных испытаний для повышения точности расчетных оценок и моделирование зависимости характеристик ВРК от числа Рейнольдса позволяет использовать данный метод в качестве простейшего средства учета масштабного эффекта.

Разработанный расчетный метод был успешно применен при моделировании различных видов маневрирования судна, оснащенного ВРК, в том числе его экстренного торможения, что позволяет оценить нагрузки на лопастях ГВ и других элементах ВРК в условиях его эксплуатации.

### Литература

1. Heinke H.-Ju Investigations about the forces and moments at podded drives, Proceedings of First international conference on technological advances in podded propulsion T-POD, 14 – 16 Apr. 2004, University of Newcastle, UK, pp. 305 – 319.
2. Полтавец П.А., Капранцев С.В., Чичерин И.А., Андреев В.А., 2015, Результаты испытаний макета винторулевой колонки при различных углах ее поворота, *Труды Крыловского государственного научного центра*, **90**, с. 103 - 108.
3. Zhao D., Guo Ch., Su Y., Dou P., Jing T. Experimental study on hydrodynamics of L-type podded propulsor in straight-ahead motion and off-design conditions, *J. Marine Sci. Appl.* (2017) 16, pp. 48 – 59.
4. Verma A., Jang H., Mahesh K. Large eddy simulation of the effect of hull on marine propulsors in crashback, SMP'11, Hamburg, Germany, June 2011.
5. Amini H., Sileo L., Steen S. Numerical calculation of the propeller shaft loads in oblique inflow by different computational models, *J. of Marine Sc. And Techn.*, 2011.
6. Woodward M. D., Atlar M., Clarke D. Comparison of stopping modes for pod-driven ships by simulation based on model testing // Proc. IMechE., vol. 219, Part M: J. Engineering for the Maritime Environment / Special issue, Paper 1, 2005, pp. 1 – 18.
7. Ayaz Z., Turan O., Vassalos D., 2004, Manoeuvring aspects of pod-driven ships, *Proceedings T-Pod*, Newcastle, UK, 14 – 16 Apr. 2004.
8. Yakovlev A. Yu., 2009, Calculation of propulsion pod characteristics in off-design operating conditions, *Proceedings of the First international symposium on marine propulsors. SMP'09*, Royal Garden Hotel, Trondheim, Norway, 22 – 24 June 2009.
9. Яковлев А. Ю., 2008, Расчет стационарных гидродинамических характеристик тянущей винторулевой колонки, *Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова*, **35**, с.96-110.
10. А.М.Басин, И.Я.Миниович, Теория и расчет гребных винтов, Л.: Судпромгиз, 1963
11. Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А., 1988, *Судовые движители*, Л., Судостроение.

12. А.А.Русецкий, Т.Ю.Прищемихина. Расчет гидродинамических характеристик гребных винтов в процессе маневрирования // Сборник "Гидродинамика транспортных судов", ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, 1981, с.45-52.
13. Binek H., Muller E. Steuerpropeller // Schiff & Hafen, Heft 12/1975, 27, Jahrgang, pp.1101-1106.
14. Каневский Г.И., Клубничкин А.М. Расчет гидродинамических характеристик движительно-рулевой колонки при замене гребного винта // Труды Крыловского государственного научного центра, вып. 92(376), 2016, с. 43 - 58.
15. Яковлев А.Ю., Колосова Е.А., Софьина Л.Ю. Численное исследование гидродинамических характеристик движителей, обусловленных маневрированием судна в условиях воздействия природных факторов // Материалы *International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering NAOE 2016*, С.-Петербург, 6 - 8 июня 2016 г.
16. Яковлев А.Ю., Васильев Ю.М., 2015, Метод расчета экстренного торможения судна с помощью нескольких движителей различных типов, *Труды Крыловского государственного научного центра*, **90**, с. 27 - 38.
17. Пустошный А.В., Бушковский В.А., Коваль А.А., Фролова И.Г., Яковлев А.Ю. Гидродинамические аспекты расчета прочности лопастей гребных винтов комплексных движителей // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, вып. 53(337), 2010, с.123-129.

#### References

1. Heinke H.-Ju Investigations about the forces and moments at podded drives, Proceedings of First international conference on technological advances in podded propulsion T-POD, 14 – 16 Apr. 2004, University of Newcastle, UK, pp. 305 – 319.
2. Poltavets P., Kaprantsev S. et al., 2015, Rezultaty ispitaniy maketa vintorulevoy kolonky pri razlichnih uglah eyo povorota, Trudy KSRC, 90, pp. 103 – 108 (Test results of podded propulsor model at different steering angles, Trans. of KSRC).
3. Zhao D., Guo Ch., Su Y., Dou P., Jing T. Experimental study on hydrodynamics of L-type podded propulsor in straight-ahead motion and off-design conditions, J. Marine Sci. Appl. (2017) 16, pp. 48 – 59.
4. Verma A., Jang H., Mahesh K. Large eddy simulation of the effect of hull on marine propulsors in crashback, SMP'11, Hamburg, Germany, June 2011.
5. Amini H., Sileo L., Steen S. Numerical calculation of the propeller shaft loads in oblique inflow by different computational models, J. of Marine Sc. And Techn., 2011.
6. Woodward M. D., Atlar M., Clarke D. Comparison of stopping modes for pod-driven ships by simulation based on model testing // Proc. IMechE., vol. 219, Part M: J. Engineering for the Maritime Environment / Special issue, Paper 1, 2005, pp. 1 – 18.
7. Ayaz Z., Turan O., Vassalos D., 2004, Manoeuvring aspects of pod-driven ships, *Proceedings T-Pod*, Newcastle, UK, 14 – 16 Apr. 2004.
8. Yakovlev A. Yu., 2009, Calculation of propulsion pod characteristics in off-design operating conditions, *Proceedings of the First international symposium on marine propulsors. SMP'09*, Royal Garden Hotel, Trondheim, Norway, 22 – 24 June 2009.
9. Yakovlev A. Yu., 2008, Raschet statsionarnih gidrodinamicheskikh harakteristik tyanushey vintorulevoy kolonky, Trudy KSRC, **35**, с.96-110 (Calculation of steady hydrodynamic characteristics of pulling podded propulsor, Trans. of KSRC).
10. Basin A., Miniovich I. Teoriya e raschet grebnyh vintov, Leningrad, Sudpromgiz, 1963 (Theory and calculation of marine propellers).
11. Artyushkov L., Achkinadze A., Rusetsky A. Sudovie dvizately, Leningrad, Sudostroenie, 1988 (Marine propulsors).
12. Rusetsky A., Prischemikhina T. Raschet gidrodinamicheskikh harakteristik grebnyh vintov v processe manevrirovaniya, Sbornik Hidrodinamika transportnih sudov, KSRC, 1981, pp. 45 – 52 (Calculation of propellers hydrodynamic characteristics during ship maneuvering).
13. Binek H., Muller E. Steuerpropeller // Schiff & Hafen, Heft 12/1975, 27, Jahrgang, pp.1101-1106.
14. Kanevsky G., Klubnichkin A. Raschet gidrodinamicheskikh harakteristik dvizitelnorulevoy kolonki pri zamene grebnogo vinta, Trudy KSRC, 92(376), 2016, pp. 43 – 58 (Calculation of podded propulsor hydrodynamic characteristics in case of propeller changing, Trans. of KSRC).
15. Yakovlev A., Kolosova E., Sofjina L., Chislennoe issledovanie gidrodinamicheskikh harakteristik dviziteley obuslovlennyh manevrirovaniem sudna v usloviayah vozdeystviya prirodnyh faktorov, Proc. of *International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering NAOE 2016*, St. Petersburg, 6 - 8 June 2016.
16. Яковлев А.Ю., Васильев Ю.М., 2015, Метод расчета экстренного торможения судна с помощью нескольких движителей различных типов, *Труды Крыловского государственного научного центра*, **90**, с. 27 - 38.
17. Пустошный А.В., Бушковский В.А., Коваль А.А., Фролова И.Г., Яковлев А.Ю. Гидродинамические аспекты расчета прочности лопастей гребных винтов комплексных движителей // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, вып. 53(337), 2010, с.123-129.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ**

УДК 629.12.001.2

**ОПРЕДЕЛЕНИЯ БУКСИРОВОЧНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ БАРЖЕ-  
БУКСИРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ СОЮЗА МЬЯНМА****Татьяна Анатольевна Апалько**

К.Т.Н.

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: apalko71@mail.ru**Александр Иосифович Гайкович**

д.т.н., профессор

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: a\_gaikov@mail.ru**Най Мьо Хлаинг**

аспирант

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: naymyohlaing3962@gmail.com**Аннотация**

Для Союза Мьянма перевозки по внутренним водным путям являются жизненно необходимыми, поскольку в сезон дождей перевозки автомобильным транспортом становится невозможным. Кроме того, водный транспорт должен обслуживать как портопункты на реке Иравади, так и портопункты в Андаманском море. Наиболее удобным видом водного транспорта могут быть составы из буксиров и барж. Буксиры и баржи могут быть построены на собственных верфях Союза Мьянма. В статье рассматриваются элементы буксиров и барж, которые могут эксплуатироваться в бассейнах Союза Мьянма. Рассматриваются характеристики водных путей и структура грузопотоков. Исследуются главные размерения барж и буксиров. Получены формулы для определения главных размерений барж и их полного водоизмещения в функции грузоподъемности. Получена двухпараметрическая аппроксимация для нахождения буксировочной мощности баржи. Для буксиров предложены эмпирические формулы для определения тяги в зависимости от буксировочной мощности баржи. Полученная совокупность формул предполагается использовать в построении математической модели для оптимизации характеристик буксирных составов для Союза Мьянма.

**Ключевые слова:** буксировочная мощность, тяга, проектирование, баржа, буксир, главные размерения,

**DEFINITIONS OF TOWING CAPACITY FOR BARGE-TOWING SYSTEMS FOR  
THE UNION OF MYANMAR****Tatyana A. Apalko**

Candidate of Technical Sciences

St. Petersburg State Maritime Technical University  
190121, St. Petersburg, ul. Lotsmanskaya, 3  
e-mail: apalko71@mail.ru**Alexander I. Gaikovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor

St. Petersburg State Maritime Technical University  
190121, St. Petersburg, ul. Lotsmanskaya, 3  
e-mail: a\_gaikov@mail.ru**Nay Myo Hlaing**

Graduate student

St. Petersburg State Maritime Technical University  
190121, St. Petersburg, ul. Lotsmanskaya, 3  
e-mail: naymyohlaing3962@gmail.com**Abstract**

For the Union of Myanmar, inland waterway transport is vital, as road transport becomes impossible during the rainy season. In addition, water transport should serve both the port points on the Irrawaddy river and the port points in the Andaman sea. The most convenient type of water transport can be trains of tugboats and barges. Tugboats and barges can be built at the Union of Myanmar's own shipyards. The article deals with the elements of tugboats and barges that can be operated in the basins of the Union of Myanmar. The characteristics of waterways and the structure of cargo flows are considered.

The main dimensions of barges and tugs are investigated. Formulas for determining the main dimensions of barges and their full displacement in the load-carrying function are obtained. A two-parameter approximation for finding the towing power of the barge is obtained. Empirical formulas for determining the thrust depending on the towing capacity of the barge are proposed for tugs. The resulting set of formulas is supposed to be used in the construction of a mathematical model to optimize the characteristics of towing trains for the Union of Myanmar.

**Keywords:** design, barge, tug, main dimensions, towing capacity, thrust.

Мьянма (б. Бирма) расположена в Юго-Восточной Азии и с 1997 года является членом Ассоциации государств Юго-Восточной Азии (АСЕАН). Мьянма граничит с Индией и Бангладеш на западе, Китаем на севере, Лаосом и Таиландом на востоке (рис.1).



Рис.1. Географическое положение Союза Мьянма

Транспортный сектор Мьянмы состоит из шести подсекторов: дорог, железных дорог, внутренних водных путей, портов, гражданской авиации и

городского транспорта. Для грузовых перевозок около 20% перевозилось автомобильным транспортом, 30% железнодорожным транспортом и 40% - внутренним водным транспортом. Среди разных транспорта, внутреннего водного транспорта (ВВТ) признается в качестве недорогого, экологически чистого способ транспортировки.

По-прежнему существуют неэффективные услуги в области автомобильного транспорта, связанные с плохой инфраструктурой, устаревшими транспортными средствами и т. д. В сезон дождей железнодорожное сообщение с соседними странами отсутствует. Поэтому для грузовых перевозок внутренний транспорт для воды становится самым важным транспортом для Мьянмы.

Порты Мьянмы Ситтве, Кьяукфью, Тандве, Патейн, Янгон, Моламьяйн, Давэй, Мирик, Кауфунг. Много рек впадают в прибрежные зоны, и реки (Иравади, Чиндвин, Танлуин, Ситтаунг) являются главными реками в Мьянме. Внутреннее судоходство осуществляется главным образом на четырех крупных реках: Иравади, Чиндвин, Танвиль и Мон-Риверс и Ситтаунг.

Главная судоходная река Мьянмы Иравади и основные характеристики показана в табл. 1.

Таблица 1.

Параметры судового хода

Река	Иравади
Длина (км)	1534
Глубина (м)	9
Средняя скорость течения (уз)	8
Габариты прохода под мостами (м)	10,21

Основные экспортные товары Мьянмы в морской торговле показаны на рис. 2.



Рис.2. Продукты для перевозок буксирными составами

Использование такого вида водного транспорта как баржебуксирные комплексы (ББК) перспективны для Союза Мьянма, поскольку все

элементы могут быть построены на собственных верфях (табл. 2 и табл. 3).

Таблица 2.

Характеристики барж, построенные в Мьянме

№	Тип	Всего	Главные размеры (LxВxН)(м)	DWT(т)
1	Bagone-800	19	56.39x10.36x2.59	500
2	Bagone-6000	31	48.77x8.84x2.29	450
3	Bagone-3000	7	38.1x7.01x2.29	250
4	C-B	1	24.99x6.096x2.07	120
5	J-R	13	24.99x6.096x2.07	120
6	Ka-Tha	6	24.99x6.096x2.07	120
7	Ta-Kha	15	24.99x6.096x2.07	120
8	Tha-Ta	2	41.08704x9.144x1.676	120
9	Bagone-8000	1	60.96x9.75x2.59	450
10	Tha	1	60.96x9.75x2.286	300
11	BK	1	48.768 x8.84 x2.286	450
12	Ta-2500	13	39.496x 7.01 x2.286	250
13	Ta-8000	9	60.96x 9.75x 2.667	500
14	Bagone-2000	1	33.528x 6.71x2.286	200
15	Sa-Lane(Tanker)	3	48.768x 8.84x2.286	500
16	Ta-1000	1	34.99x 5.995x2.286	100
17	Sa-Lane-2000	1	33.53x 6.71x2.286	200
18	Bagone-9000	2	-	-
19	Мое	1	34.75x6.71x2.286	200
		128		



Таблица 3.

**Характеристики буксиров, построенных в Мьянме**

№	Тип	Всего	Главные размеры (LxВxD)(м)
1	Sin Pyaung	1	36.576x9.144x2.4384
2	Sin Hine	5	28.0416x7.62x2.286
3	Kyant	7	25.6032x6.096x1.9812
4	Kwyal	5	21.9456x5.0292x1.8288
5	Sin Kalay	2	24.9936x5x1.8
		20	

В последние годы увеличилась роль грузовых перевозок по реке Иравади. Однако, в настоящее время флот состоит в основном из отслуживших свой срок судов, которые не могут освоить требуемые грузопотоки. Поэтому, необходимо создать водный транспорт на базе новых судов, в том числе, барж и буксиров. Указанная работа является частью исследования концепции ББК для Союза Мьянма.

На начальной стадии проектирования, основные размеры барж, с учетом мирового опыта, может быть получены из результаты статистических исследований, которых приведены на рис. 3,4,5,6,7.

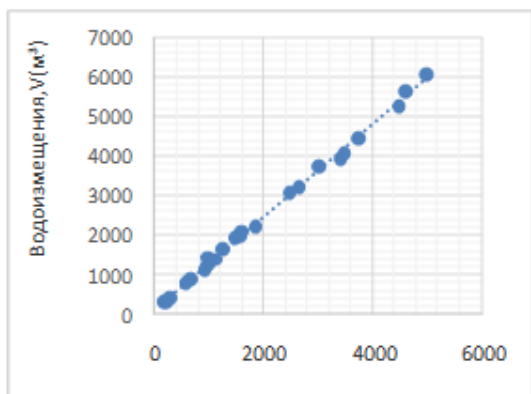


Рис.3. Зависимость водоизмещения баржи от грузоподъемности

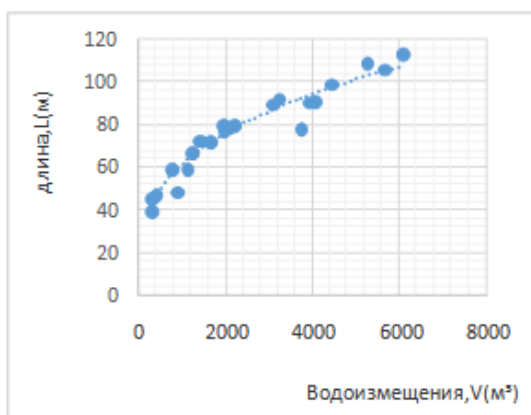


Рис.4. Зависимость длины баржи от водоизмещения

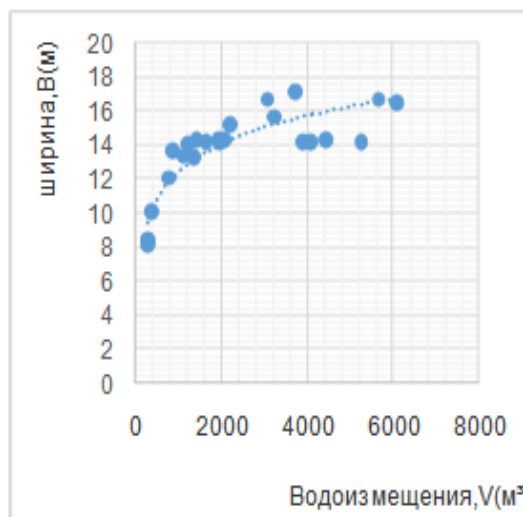


Рис.5. Зависимость ширины баржи от водоизмещения судна

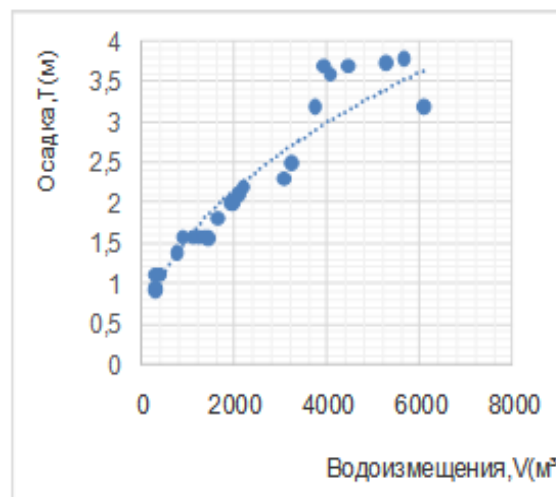


Рис.6. Зависимость осадки баржи от водоизмещения судна

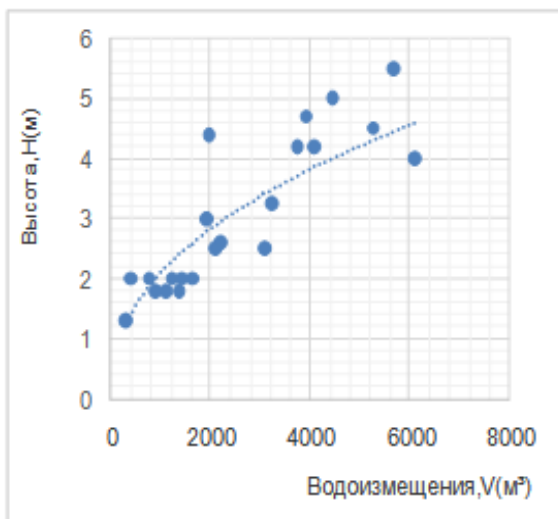


Рис.7. Зависимость высоты борта баржи от водоизмещения

$$V = 1,1797 \cdot P_{ГР} + 86,518 \quad (1)$$

коэффициент корреляции  $R^2$  зависимости (1) равен 0,997.

$$L = 6,7979 \cdot V^{0,3188} \quad (2)$$

коэффициент корреляции  $R^2$  зависимости (2) равен 0,944.

$$B = 2,4606 \cdot \ln(V) - 4,887 \quad (3)$$

коэффициент корреляции  $R^2$  зависимости (3) равен 0,937.

$$T = 0,0604 \cdot V^{0,4708} \quad (4)$$

коэффициент корреляции  $R^2$  зависимости (4) равен 0,953.

$$H = 0,101 \cdot V^{0,438} \quad (5)$$

коэффициент корреляции  $R^2$  зависимости (5) равен 0,907/

Т.о. основные характеристики барж в первом приближении определяются по алгоритму формулам (1),(2),(3),(4),(5).

Для определения требуемой мощности буксира необходимо определить буксировочное сопротивление баржи.

В первом приближении буксировочное сопротивление баржи при скорости буксировки в 8 узлов может быть определено по эмпирической формуле:

$$EPS_{Б} = 309,8458 + 13,7418 \cdot L - 127,1301 \cdot B + 0,109 \cdot L^2 + 10,3185 \cdot B^2 - 1,8102 \cdot L \cdot B \quad (6)$$

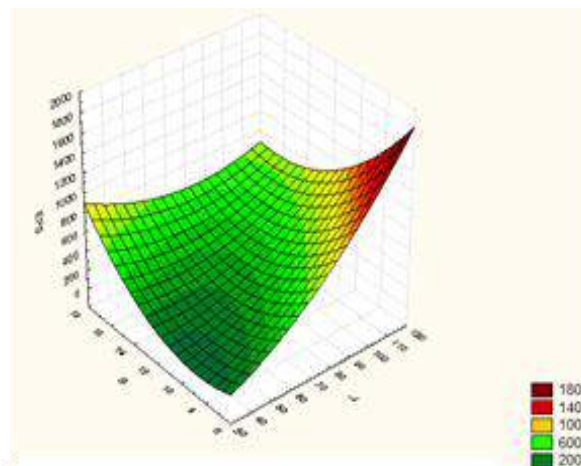


Рис. 8. Поверхность аппроксимации (Б)

На начальных стадиях проектирования требуемая тяга буксира может быть определена через буксировочную мощность баржи.

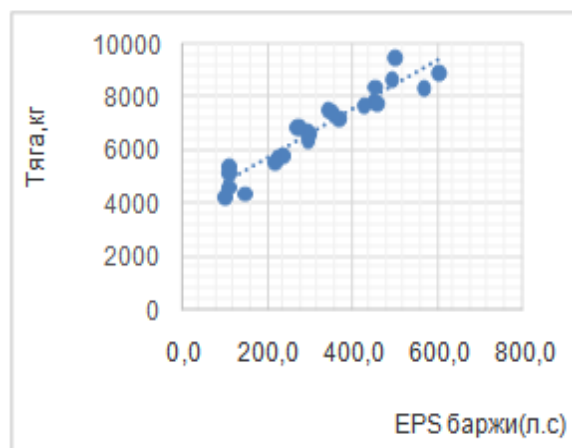


Рис.9. Зависимость тяги буксира Z от буксировочной мощности баржи

рис.9 показана статистика, на основании которой получена формула:

$$Z = 9,3338 \cdot EPS_{Б} + 3804 \quad (7)$$

коэффициент корреляции  $R^2$  (7) равен 0,905.

На начальной стадии проектирования, мощность энергетической установки буксира можно получить эмпирическую формулу на основании выборки, показанной на рис. 10.

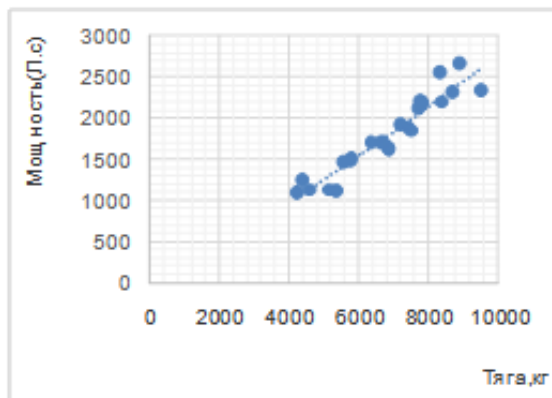


Рис. 10. Зависимость мощности ЭУ буксира от тяги

Полученная эмпирическая формула:

$$N = 0,0724 \cdot Z^{1,1446} \quad (8)$$

коэффициент корреляции  $R^2$  (8) равен 0,910.

**Заключение**

Полученные авторами формулы имеют достаточную точность для использования для начальных стадий проектирования барже-буксирных комплексов. Данный расчет может быть использован в математических моделях оптимизации основных кораблестроительных характеристик элементов баржебуксирных комплексов.

**Литература**

1. Богданов Б.В. Морские и рейдовые баржи. Проектирование и конструкция. – Л., Изд. Судпромгиз, 1963, 296 с.
2. Ваганов Г.И., Воронин В.Ф., Шанчурова В.К. Тяга судов. – М., Изд. «Транспорт», 1986., 199 с
3. Богданов Б.В., Петров М.К. Морская Буксировка. – Л., Изд. «Судостроение», 1988., 286 с.
4. Богданов Б.В., Слущкий А.В., Шмаков М.Г., Васильев К.А., Соркин Д.Х. Буксирные суда. – Л., Изд. «Судостроение», 1974, 280 с.
5. Сидорченко В.Ф. Морские буксиры и их операции. – Л., Изд. «Судостроение», 1986., 240 с.

**References**

1. Bogdanov B.V. Sea and raid barges. Design and construction. - L., Ed. Sudpromgiz, 1963, 296 p.
2. Vaganov G.I., Voronin V.F., Shankurova V.K. Traction of ships. – M., Ed. "Transport", 1986., 199 p.
3. Bogdanov B.V., Petrov M.K. Sea Towing. - L., Ed. Shipbuilding, 1988., 286 p.
4. Bogdanov B.V., Slutsky A.V., Shmakov M.G., Vasilyev K.A., Sorkin D.Kh. Tugboats. - L., Ed. Shipbuilding, 1974, 280 p.
5. Sidorchenko V.F. Sea tugs and their operations. - L., Ed. Shipbuilding, 1986., 240 p.

УДК 629.12.001.2

## СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ ОСНОВНЫХ КЛАССОВ

**Александр Иосифович Гайкович**

д.т.н., профессор

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: a\_gaikov@mail.ru**Николай Васильевич Никитин**

д.т.н., профессор

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: mit-journal@mail.ru

### Аннотация

В статье приводятся результаты статистического исследования основных кораблестроительных элементов надводных кораблей классов эсминцев, фрегатов и корветов. Базой исследования были открытые данные по кораблям ведущих стран: США, Россия, Китай, Япония, Индия, Великобритания, Франция, Южная Корея, Италия, Бразилия, Испания, Турция, Индонезия, Нидерланды, Дания, Австралия. Число кораблей в выборке 95. Исследовались соотношения главных размерений, адмиралтейский коэффициент, энергонасыщенность и численность экипажа. На современных надводных кораблях используются комбинированные энергетические установки. Представляет интерес соотношение между мощностями маршевых и форсажных двигателей. Статистическое исследование подтвердило тенденцию уменьшения численности экипажа вследствие внедрения автоматических и автоматизированных систем. Отмечается также рост энергонасыщенности боевых надводных кораблей из-за роста потребления электроэнергии для систем вооружения и других потребителей. На основании полученных выборок получены эмпирические формулы, которые могут применяться в качестве оценок на начальных стадиях проектирования.

**Ключевые слова:** статистика, боевой надводный корабль, главные размерения, мощность энергетической установки, экипаж.

## STATISTICAL STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF THE MAIN CLASS ADWATER CRAFT

**Aleksandr I Gaikovich**

the professor, Dr.Sci.Tech.,

State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation**Nikolay V. Nikitin**

the professor, Dr.Sci.Tech.,

State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation

e-mail: mit-journal@mail.ru

### Annotation

The article presents the results of a statistical study of the main shipbuilding elements of surface ships of classes of destroyers, frigates and corvettes. The study was based on open data on the ships of the leading countries: USA, Russia, China, Japan, India, UK, France, South Korea, Italy, Brazil, Spain, Turkey, Indonesia, Netherlands, Denmark, Australia. The number of co-rables in the sample is 95. The ratios of the main dimensions, the Admiralty coefficient, energy saturation and the number of crew were investigated. On modern surface ships combined power plants are used. Of interest is the ratio between the power of the main and afterburner engines. The statistical study confirmed the trend of reducing the number of crew due to the introduction of automatic and automated systems. There is also an increase in the energy saturation of combat surface ships due to the growth of electricity consumption for weapons systems and other consumers. On the basis of the obtained samples, empirical formulas are obtained that can be used as estimates at the initial stages of design.

**Key words:** statistics, combat surface ship, main dimensions, power of power plant, crew.

### Введение

Метод статистических исследований широко используются в теории проектирования судов и кораблей [1], [2], [3], [4].

Для проведения исследовательского проектирования боевых надводных кораблей, а

также на начальных этапах практического проектирования, необходимо определить ряд параметров корабля, не используя данные конкретного прототипа.

Как правило, к таким параметрам относятся характеристики формы корпуса, элементы,

связанные с определением мощности главных двигателей при решении уравнения нагрузки и т.п.

Для решения сформулированной задачи было проведено статистическое исследование характеристик надводных боевых кораблей основных классов: крейсеров, эсминцев, фрегатов, корветов и патрульных кораблей.

В качестве выборки для статистического анализа использовались данные по кораблям стран, имеющих максимальные рейтинги по потенциалу своих ВМС. К таким странам были отнесены: США, Россия, Китай, Япония, Индия, Великобритания, Франция, Южная Корея, Италия, Бразилия, Испания, Турция, Индонезия, Нидерланды, Дания, Австралия.

Всего получены данные по 95 кораблям. Для получения более точных статистических оценок корабли в выборке были сгруппированы по значению полного водоизмещения: от 4000т, в диапазоне 2000 ... 4000 т и меньше 2000 т.

**1. Статистическое исследование основных кораблестроительных элементов боевых надводных кораблей.**

Соотношение между полным водоизмещением D и стандартным водоизмещением Dст (для всей выборки) позволяет оценить запасы топлива:

$$D_{ст}/D = 0,834 \pm 0,063 \quad (1)$$

В формуле (1) первое слагаемое соответствует математическому ожиданию, а второе – среднеквадратическому отклонению (СКВО).

Интерес к соотношению между длиной по конструктивной ватерлинии Lквл и максимальной длиной Lмакс связан с возможностью получения необходимых данных для расчетов статики и динамики, когда имеется только иллюстративный материал по кораблю-аналогу. Статистическое соотношение:

$$L_{квл} = 0,929 L_{макс} - 1,109 \quad (2)$$

Коэффициент корреляции зависимости (2) равен 0,995.

Отношения ширины В к осадке Т и отношение высоты борта Н к Т характеризуют начальную остойчивость, остойчивость на больших углах крена, а также вместимость и запас плавучести. Результат обработки гистограмм:

$$В/Т = 3,25 \pm 0,47 \quad (3)$$

$$Н/Т = 2,12 \pm 0,54 \quad (4)$$

Выборка по отношению высоты борта к осадке невелика, то соотношение (4) должно рассматриваться как нулевое приближение.

К характеристикам, связанным с ходовыми качествами, относятся отношение длины по КВЛ к ширине борта В и относительная длина корабля  $l = L_{квл}/(V)^{1/3}$ , где V – является полным объемным водоизмещением.

Обработка гистограмм распределения указанных величин для общей выборки дали следующие результаты:

$$L_{квл}/В = 7,45 \pm 1,01 \quad (5)$$

$$l = 7,32 \pm 0,59 \quad (6)$$

Зависимость отношений L/V и l от скорости и водоизмещения слабая. Полученные коэффициенты корреляции получились меньше 0,5.

Характеристики распределения чисел Фруда по длине и по водоизмещению:

$$Fr = 0,455 \pm 0,090 \quad (7)$$

$$Fr_D = 1,23 \pm 0,24 \quad (8)$$

Важным параметром, используемый на начальных стадиях проектирования для определения мощности главных двигателей, является адмиралтейский коэффициент:

$$C_N = \frac{D^{2/3} \cdot v_s}{N} \quad (9)$$

где N – мощность главных двигателей, vs – скорость полного хода в узлах.

Статистический анализ показал, что для генеральной совокупности он равен:

$$C_N = 135 \pm 36 \quad (10)$$

Для групп по водоизмещению значение адмиралтейского коэффициента разнятся:

$$C_N = 145 \pm 29 \text{ для } D > 4000 \text{ т} \quad (11)$$

$$C_N = 140 \pm 43 \text{ для } 2000 \text{ т} < D < 4000 \text{ т} \quad (12)$$

$$C_N = 109 \pm 36 \text{ для } D < 2000 \text{ т} \quad (13)$$

Средняя погрешность расчетов с использованием математического ожидания адмиралтейского коэффициента, для указанных групп водоизмещения, составила 15,1%, 19,3% и 22,9% соответственно.

Дополнительно при определении мощности, необходимой для достижения полной скорости хода использовалась многопараметрическая линейная аппроксимация. Аппроксимирующая поверхность для мощности в л.с., являющаяся функцией от полного водоизмещения и полной скорости, для общей выборки показана на рис. 1.

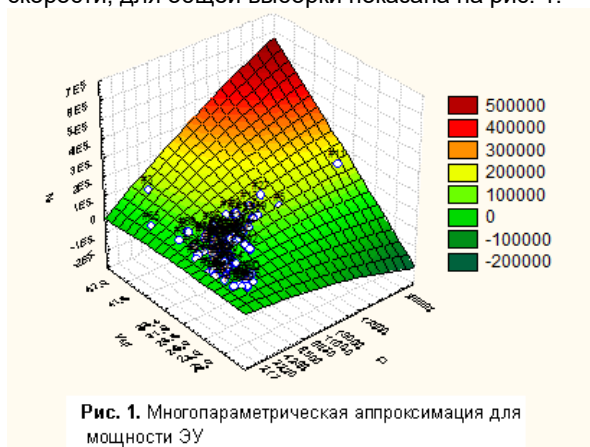


Рис. 1. Многопараметрическая аппроксимация для мощности ЭУ

Расчетная зависимость имеет вид:

$$N = -56445 - 143415 \cdot D + 3940 \cdot v_s - 0,0002 \cdot D^2 +$$

$$+0,7623 \cdot D \cdot v_s - 46,578 \cdot v_s^2 \pm 7442 \quad (14)$$

Средняя абсолютная ошибка составляет 7269 л.с., а средняя относительная ошибка равна 17,4%.

Для определения характеристик комбинированных пропульсивных систем интерес представляет отношение мощности маршевых двигателей  $N_m$  к общей мощности пропульсивной системы  $N$ :

$$N_m / N = 0,234 \pm 0,108 \quad \text{для } D > 4000 \text{ т} \quad (15)$$

$$N_m / N = 0,206 \pm 0,032 \quad \text{для } 2000 \text{ т} < D < 4000 \text{ т} \quad (16)$$

$$N_m / N = 0,315 \pm 0,159 \quad \text{для } D < 2000 \text{ т} \quad (17)$$

Энергонасыщенность, определяемая как отношение мощности корабельной электростанции  $N_{эл}$  (кВт) к полному водоизмещению  $D$ , статистически равна:

$$N_{эл} / D = 0,778 \pm 0,293 \quad (18)$$

На рис. 2 показана тенденция изменения энергонасыщенности по годам для генеральной выборки.

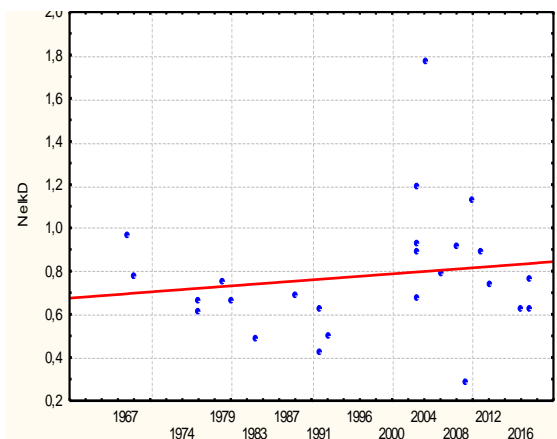


Рис. 2. Эволюция энергонасыщенности

Для предварительной оценки автономности по провизии и воды, а также с учетом требований вместимости, было изучено отношение численности экипажа  $n_{эк}$  на 1 тонну полного водоизмещения. Результат показан ниже, а тенденция изменения удельной численности экипажа показаны на рис. 3.

$$n_{эк} / D = 0,038 \pm 0,014 \quad \text{для } D > 4000 \text{ т} \quad (19)$$

$$n_{эк} / D = 0,048 \pm 0,017 \quad \text{для } 2000 \text{ т} < D < 4000 \text{ т} \quad (20)$$

$$n_{эк} / D = 0,063 \pm 0,025 \quad \text{для } D < 2000 \text{ т} \quad (21)$$

**Выводы.**

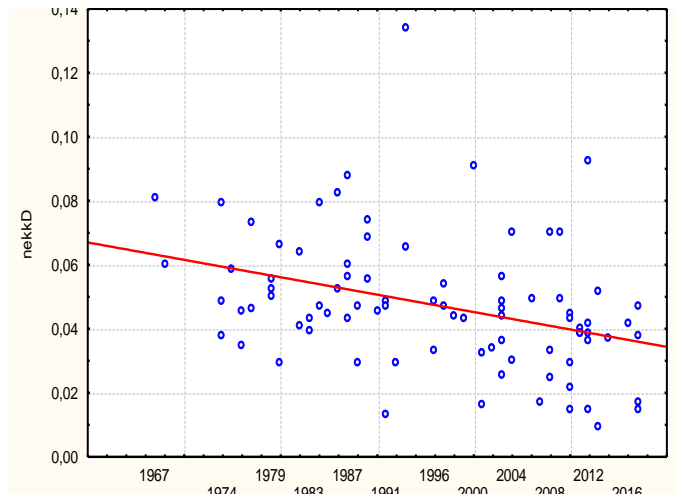


Рис. 3. Эволюция численности экипажа

1. Соотношения главных размерений и величины характеристик, связанных с ходкостью, как относительная длина и отношение длины к ширине, имеют большие значения, чем у морских транспортных судов. Это говорит о том, что требования ходкости остаются для боевых кораблей одним из приоритетных.
2. Соотношение ширины к осадке, определяющее остойчивость также превышает значение для морских транспортных судов. Это объясняется необходимостью наличия запаса остойчивости при получении боевых повреждений.
3. Расчеты мощности пропульсивной системы с использованием адмиралтейского коэффициента дают значительную погрешность. Это связано с необходимостью выделения кораблей со скоростью полного хода 30 узлов и выше и кораблей с меньшей скоростью. Уменьшение полной скорости боевых надводных кораблей показывает уменьшение эксплуатационных расходов, увеличение дальности плавания и возможности размещения дополнительного вооружения. Необходимо исследование адмиралтейского коэффициента и формы зависимостей для расчета мощности с разбиением выборки по скоростным диапазонам.
4. Очевидна тенденция увеличения энергонасыщенности кораблей. Особенно этот феномен связан с проектированием и эксплуатацией кораблей с электродвижением. На рис. 9 к таким кораблям соответствуют точки существенно превышающие линию регрессии.
5. Тренд удельной численности экипажа показывает увеличение степени автоматизации надводных кораблей. В сравнительно недалеком будущем снижение численности экипажа будет происходить быстрее за счет разработки и принятия на вооружение робототехнических систем.

---

**Литература**

1. Ногид Л.М. Теория проектирования судов. – Л., Изд. Судпромгиз, 1955, 480 с.
2. Ашик В.В. Проектирование судов.- Л., Изд. «Судостроение», 1975, 352 с.
3. Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов. Т.1. Описание системы "Корабль". – СПб., Изд. "МОРИНТЕХ", 2014, 819 с.
4. Гайкович А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов. Т.2. Анализ и синтез системы "Корабль". – СПб., Изд. "МОРИНТЕХ", 2014, 872 с.

**References**

1. Nogid L.M. Teorija proektirovanija sudov. – L., Izd. Sudpromgiz, 1955, 480 s.
2. Ashik V.V. Proektirovanie sudov.- L., Izd. «Sudostroenie», 1975, 352 s.
3. Gajkovich A.I. Teorija proektirovanija vodoizmeshhajushih korablej i sudov. T.1. Opisaniye sistemy "Korabl'". – SPb., Izd. "MORINTEH", 2014, 819 s.
4. Gajkovich A.I. Teorija proektirovanija vodoizmeshhajushih korablej i sudov. T.2. Analiz i sintez sistemy "Korabl'". – SPb., Izd. "MORINTEH", 2014, 872 s.



УДК 338.33

## О ВОЗМОЖНОСТЯХ ОСВОЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ РЫНКОВ СБЫТА СУДОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ

**Мария Евгеньевна Гоголюхина**

кандидат экономических наук, доцент кафедры  
управления судостроительным производством  
Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: m.gogolukhina@mail.ru

**Лейла Эльдар гызы Мамедова**

кандидат экономических наук, доцент кафедры  
управления судостроительным производством  
Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: maleyla@yandex.ru

### Аннотация

Вопрос расширения традиционных рынков сбыта актуален для любого предприятия, функционирующего в условиях рыночной экономики, в том числе судостроительного. С одной стороны, предприятию проще концентрировать свое внимание на одном продукте. При этом может быть достигнут наиболее высокий технологический уровень, высокая производительность, а также максимальная рентабельность деятельности. Тем не менее, это не всегда возможно, так как рынок не всегда способен воспринять то количество продукции, на которое рассчитана производственная мощность предприятия. Последнее особенно актуально для крупных промышленных предприятий, сформированных еще в период плановой экономики, к которым можно отнести большинство российских судостроительных предприятий. Необходимо разработать методику, которая позволила бы судостроительному предприятию определить для себя поле допустимых стратегий развития, из которого можно будет выбрать наиболее интересную как с точки зрения рынка, так и с точки зрения экономической эффективности.

**Ключевые слова:** стратегия развития, судостроительное предприятие, диверсификация, методика выбора, рентабельность, рыночные ограничения, экономические ограничения, уровень диверсифицированности, специализация

## OPPORTUNITIES OF A SHIPBUILDING YARD AT NON-CONVENTIONAL MARKETS

**Maria E. Gogolukhina**

PhD in Economic Sciences, Associate Professor at the Chair of Management in Shipbuilding  
Saint-Petersburg State Marine Technical University  
190121, Russia, Saint-Petersburg, Lotsmanskaya street, 3  
e-mail: m.gogolukhina@mail.ru

**Leyla E. Mamedova**

PhD in Economic Sciences, Associate Professor at the Chair of Management in Shipbuilding  
Saint-Petersburg State Marine Technical University  
190121, Russia, Saint-Petersburg, Lotsmanskaya street, 3  
e-mail: maleyla@yandex.ru

### Abstract

Selection of definite product strategy is one of the most relevant questions for each enterprise, as well as for each shipbuilding yard, operating within the terms of the market economy. On one hand, it is easier to the enterprise to concentrate its attention on a sole product. In this case the highest technological level, the highest level of productivity and maximum economic efficiency could be achieved. Although it is rarely possible, because the market mostly can't accept that amount of products, which a large industrial enterprise is able to produce. The last concerns especially those industrial enterprises, which were founded during the period of the planned economy. The majority of Russian shipbuilding yards are among them. It is necessary to develop such a method, which allows a shipbuilding yard to form a field of acceptable product strategies. Within this field of strategies the enterprise will be able to choose an optimal one considering both market opportunities and economic efficiency.

**Key words:** development strategy, shipbuilding yard, diversification, selection method, profitability, market requirements, economic requirements, diversification level, specialization.

## Введение

Судостроение является отраслью, подверженной циклическим колебаниям спроса, и как следствие в кризисные для отрасли периоды возникает острая проблема недозагрузки производственных фондов профильной продукцией. Так отечественная судостроительная отрасль пережила глубочайший кризис, связанный с концом эпохи плановой экономики. Сокращение до минимума госзаказа и неумение предприятий самостоятельно действовать на рынке привело к резкому падению объемов производства и поставило многие судостроительные предприятия на грань банкротства. Несмотря на то, что в последнее десятилетие российские судостроительные предприятия начали возрождаться, загрузка имеющихся производств далека от оптимальной.

### 1. Цели диверсификации судостроительного предприятия

Под диверсификацией понимается такая долгосрочная стратегия предприятия, в процессе осуществления которой предприятие, развивая имеющиеся в распоряжении мощности, наряду с выпуском «традиционной» для него продукции, осваивает выпуск новых для себя видов продукции, с выходом на новые для себя рынки.

Возникает вопрос, с чем может быть связано стремление предприятия диверсифицировать свою деятельность. Логичным казалось бы наоборот специализировать свое производство, осваивая минимальное количество наименований подобной продукции. Специализированное предприятие имеет возможность концентрировать свое внимание исключительно на изучении одного направления, использовать отработанные годами технологии, иметь узко специализированное оборудование, а также высококвалифицированный в данной области персонал. Благодаря этому может быть достигнуто максимальное качество продукции (оказания услуг), а также высочайший технологический уровень производства (оказания услуг) в данной конкретной отрасли.

Подобное предприятие идеально вписывается в систему плановой экономики, где для каждого экономического агента четко определено место в системе народного хозяйства. При этом каждое отдельное предприятие является винтиком огромной экономической машины, который должен действовать в соответствии с установленными правилами и разработанным планом. В качестве положительных для предприятия моментов можно рассматривать гарантированный сбыт и отсутствие конкуренции ввиду того, что все производители замкнуты на определенных потребителей в соответствии с планом развития народного хозяйства. Кроме того, тем же планом предусматривается оптимальная загрузка мощностей, что, в свою очередь, обеспечивает полную загрузку персонала.

Система рыночной экономики ставит предприятие в более жесткие условия, делая его не просто исполнителем спускаемых сверху заданий, а экономически и юридически самостоятельным лицом. В задачи предприятия теперь входит не просто производство продукции, но и ее сбыт на соответствующих сегментах рынка. К сожалению,

рынок не всегда способен воспринять то количество продукции, на выпуск которого рассчитаны мощности большинства российских предприятий. Напрашивается вывод о том, что диверсификация является одним из способов, позволяющих предприятию не только удержаться на плаву в условиях рынка, но и обеспечить себе эффективное функционирование и развитие.

Можно выделить два основных *вида целей, преследуемых в ходе диверсификации предприятия*: повышение эффективности функционирования и выравнивание (снижение) рисков предприятия. Рассмотрим их подробнее.

1. Источником *повышения эффективности* предприятия могут быть, с одной стороны, более высокие показатели рентабельности нового вида деятельности по сравнению со старым, с другой стороны, синергический эффект, получаемый при совмещении «старого» и «нового» видов деятельности.

Эффективность или рентабельность предприятия зависит от того, оптимально ли используются его ресурсы. Цель диверсификации заключается в наиболее выгодном применении неэффективно используемых или избыточных материальных и нематериальных ресурсов. Если осуществление диверсифицированной производственной программы выгоднее для предприятия с точки зрения затрат, загрузки мощностей, использования капитала, чем «раздельное» производство, возникает так называемый синергический эффект, или эффект « $2+2=5$ ».

Синергический эффект заключается в возрастании эффективности деятельности в результате соединения, интеграции, слияния отдельных частей в единую систему за счет так называемого системного эффекта. Он может выражаться в снижении постоянных издержек предприятия из расчета на одну единицу продукции, лучшей загрузки факторов производства, в финансовых преимуществах. В целом, синергический эффект позволяет предприятию повысить эффективность функционирования, благодаря лучшему использованию имеющихся ресурсов.

2. Второй вид целей, который может преследоваться в ходе диверсификации предприятия, заключается в *снижении существующих рисков*, связанных с деятельностью предприятия. Выход на новые рынки имеет целью повысить «сопротивляемость» предприятия к отрицательным воздействиям окружающей его среды, а именно снизить риск, связанный со спецификой уже освоенных предприятием направлений.

Деятельность в нескольких областях будет компенсировать негативные тенденции каждого по отдельности вида деятельности, стабилизируя обороты и увеличивая прибыли предприятия в целом. Таким образом, для предприятий, чья производственная программа подвержена различным сезонным или конъюнктурным колебаниям, диверсификация – это возможность «выровнять» свою доходность в целом, иными словами, снизить риск неполучения ожидаемых доходов. При этом сезонные и конъюнктурные спады

спроса на освоенную продукцию должны перекрываться фазой максимального спроса на новую продукцию.

Необходимо учесть, что диверсификация не может снизить общий предпринимательский риск. Более того, диверсификация сама по себе связана с риском. С помощью данной стратегии можно снизить исключительно риск, связанный со снижением спроса на освоенный предприятием продукт, вызванный устареванием продукта, появлением новых конкурентов или изменением предпочтений потребителей. Предприятие подвержено большему риску, чем меньше продуктов на меньшем количестве рынков им представлено. Проиллюстрировать последнее утверждение можно с помощью следующего рисунка (Рис. 1).



Рис.1 Зависимость общего риска предприятия от уровня его диверсифицированности

Общий риск предприятия складывается из систематического и несистематического риска. Систематический или неизбежный риск связан с колебаниями на рынке в результате изменений в экономике и политике в целом, такими как налоговые реформы, изменения мировой энергетической ситуации, парламентские выборы, ограничительные санкции. Этот риск не может быть устранен посредством диверсификации, так как вышеуказанные факторы воздействует на все отрасли экономики.

Несистематический или остаточный риск – это риск, специфический для отдельного вида деятельности предприятия, который может быть вызван, например, появлением на рынке нового мощного конкурента или же техническим прорывом, который делает выпускаемую продукцию устаревшей. Этот тип риска может быть снижен посредством диверсификации, так как в случае «провала» в одном из видов деятельности, предприятие не прекращает свою работу в других направлениях. Как уже было указано выше, диверсификация создает предприятию дополнительную точку опоры. Если, скажем, одна из десяти опор ломается, предприятие будет поддерживать оставшиеся девять.

Максимальное выравнивание риска более вероятно при продольной диверсификации, при которой традиционная и новая отрасли наименее взаимосвязаны, и поэтому подвержены влиянию разных факторов. Так негативные тенденции, наметившиеся в одной отрасли, и соответственно

снижающие эффективность вида деятельности, относящегося к ней, не скажутся на тех видах деятельности, которые относятся к другим отраслям.

## 2. Выбор стратегии освоения альтернативных рынков сбыта для судостроительного предприятия.

С целью выбора стратегии освоения альтернативных рынков сбыта для судостроительного предприятия, следует определить, до какого предела предприятию выгодно диверсифицировать свою деятельность. Исследования показали, что рентабельность судостроительного предприятия снижается при сокращении доли основного продукта в общем объеме производства и увеличении уровня диверсифицированности.

Была произведена **аппроксимация полученных эмпирических данных**, которая показала, что зависимость рентабельности от уровня диверсифицированности судостроительного предприятия представляет собой полиномиальное уравнение

$$y = ax^2 + bx + P_{max} \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент, определяющий наклон кривой в зависимости от объема производства,  $a < 0$ ;  
 $b$  – коэффициент, определяющий наклон кривой, в зависимости от объема производства;

$P_{max}$  – максимальная рентабельность при данных объемах производства и норме прибыли на основной продукт.

Соответственно была построена теоретическая кривая зависимости рентабельности судостроительного предприятия от уровня его диверсифицированности (Рис.2).

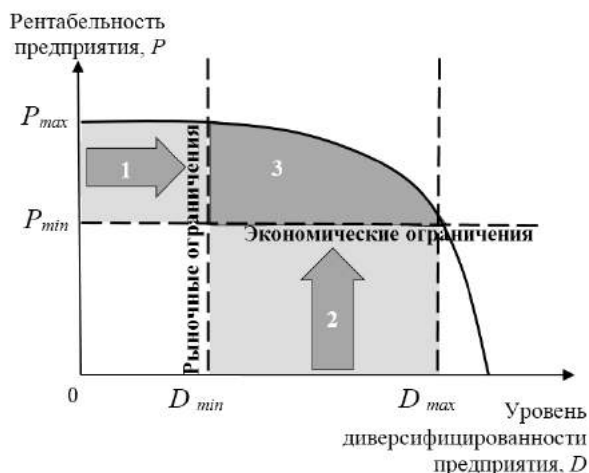


Рис.2 Поле допустимых стратегий развития судостроительного предприятия

где 1 – определение минимально возможного уровня диверсифицированности предприятия в связи с рыночными ограничениями

2 – определение минимально допустимого уровня рентабельности предприятия

3 – поле допустимых стратегий развития судостроительного предприятия

Рассмотрим основные **шаги определения поля допустимых стратегий развития судостроительного предприятия**, представленные на рис.2:

1. Шаг 1 (рис.2) предполагает определение минимально допустимого значения уровня диверсифицированности ( $D_{\min}$ ) судостроительного предприятия, обусловленного **рыночными ограничениями**. Максимальное значение рентабельности соответствует  $D=0$ , который соответствует 100%-ной загрузке судостроительного производства наиболее рентабельной продукцией – военными кораблями на экспорт. Военная техника является наиболее науко- и трудоемкой, а значит и наиболее дорогой, по сравнению с прочей продукцией, которую может выпускать судостроительное предприятие. На используемые в процессе производства сырье, материалы и устанавливаемое на корабли оборудование начисляется высокий процент прибыли, что делает военную технику наиболее рентабельным видом продукции. Однако это далеко не всегда возможно в связи с тем, что существуют рыночные ограничения. Поэтому для увеличения объемов производства необходимо диверсифицировать деятельность предприятия до определенного предела.

2. Шаг 2 (рис.2) определяет минимально допустимый уровень рентабельности для судостроительного предприятия, ниже которого предприятия становится не интересно работать, то есть **экономические ограничения**. Рентабельность предприятия снижается по мере отхода от основного вида деятельности, поэтому существует также и верхняя граница диверсифицированности, обусловленная экономическими соображениями. Таким образом, значению функции  $P=P_{\min}$  соответствует максимальное допустимое значение уровня диверсифицированности  $D_{\max}$ .

3. Формируется **поле допустимых стратегий** развития (рис.2) судостроительного предприятия. При выборе рациональной стратегии предприятие должно рассматривать совокупность допустимых вариантов, рентабельность ( $P_i$ ) которых находится в пределах  $P_{\min} < P_i < P_{\max}$ , а уровень диверсифицированности ( $D_j$ ) – в пределах  $D_{\min} < D_j < D_{\max}$ .

На основе принципов определения поля рациональных продуктовых стратегий судостроительного предприятия (рис.2) формируется полноценная методика, которая может применяться любыми судостроительными предприятиями, т.к. они обладают схожим набором производственных возможностей.

**Методика выбора альтернативных рынков сбыта судостроительного предприятия** (рис.3) включает в себя реализацию следующих этапов:

I. определение *основного вида продукции*;

II. определение *прочих видов продукции*, которые может выпускать предприятие, и расположение их в порядке удаления от основного вида деятельности согласно специфичному для данного предприятия принципу (технологический принцип, принцип удаления от основного рынка сбыта);

III. определение *рыночных ограничений* по производству той или иной продукции, а именно оценка максимально возможного объема сбыта продукции различных видов и расчет соответствующей производственной программы в трудовом выражении;

IV. определение *максимально возможной доли каждого продукта* в производственной программе в зависимости от общего объема производства предприятия в соответствии с установленными рыночными ограничениями;

V. *оценка различных вариантов сочетания продуктов* в производственной программе предприятия и составление матрицы результатов расчета;

VI. определение *минимального уровня рентабельности*, при котором предприятие готово работать, и ограничение уровня диверсифицированности ( $D$ ) в соответствии с установленными экономическими требованиями при разных объемах производства;

VII. *выбор варианта диверсификации* в зависимости от общего объема производства, который планируется достичь.

При проведении диверсификации в новые сферы деятельности необходимо учитывать, что освоение новых видов деятельности должно начинаться до того, как наступит кризис в традиционных видах деятельности. Важно вовремя отметить снижение темпов роста в традиционном виде деятельности с целью использования избыточных ресурсов в новых для предприятия направлениях. Кроме того, в случае оживления традиционного вида деятельности нельзя оставлять без внимания те направления, которые позволили предприятию сохранить свои темпы развития в период спада в традиционной сфере, так как и впоследствии при возможных колебаниях традиционного рынка предприятие сможет положиться на уже освоенные параллельные виды деятельности.

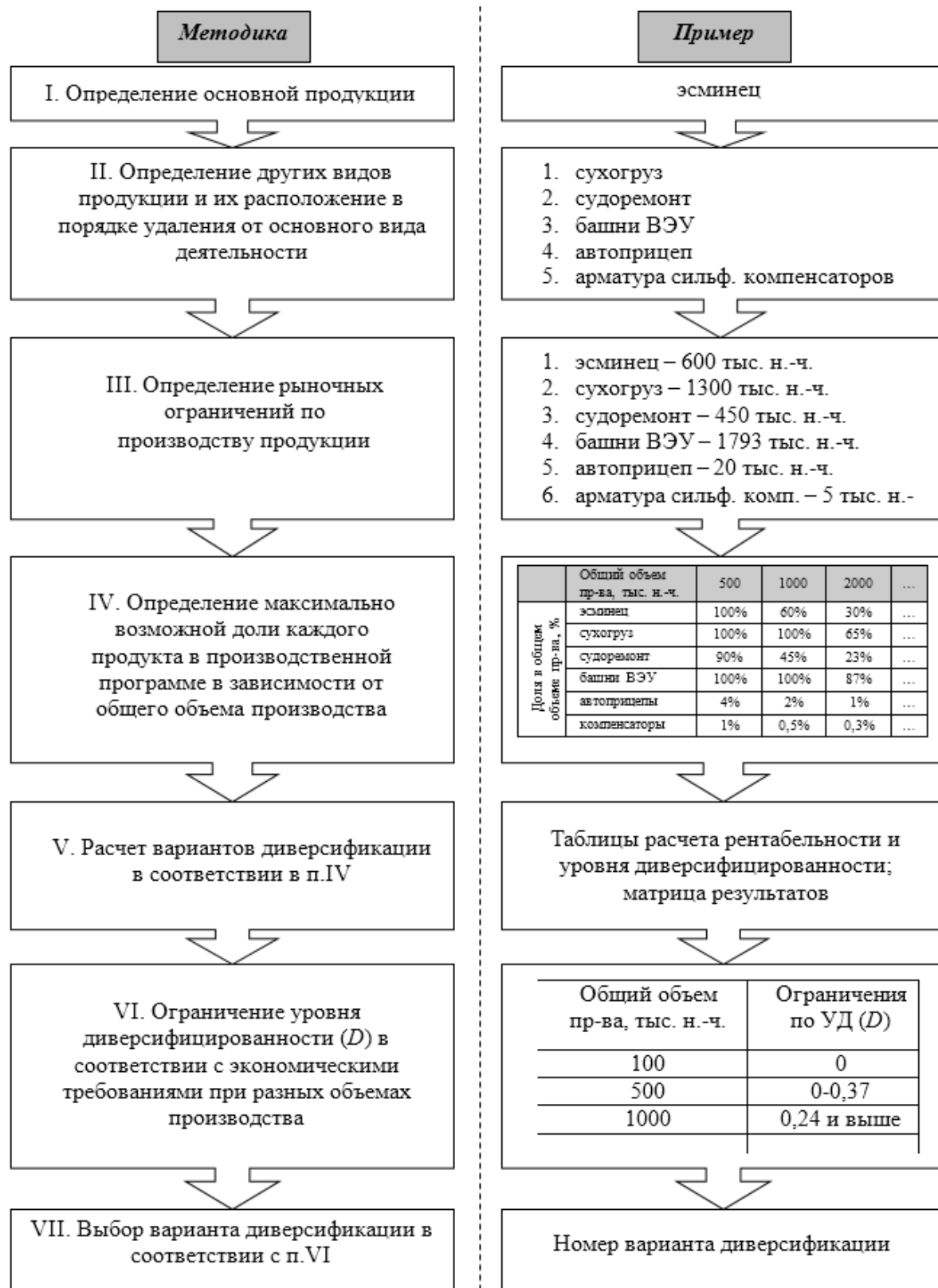


Рис 3. Основные этапы выбора альтернативных рынков сбыта судостроительного предприятия

**Заключение**

Анализ мировых рынков гражданского и военного судостроения свидетельствует о том, что отечественные судостроительные предприятия, могут рассчитывать на получение профильных заказов в ближайшей перспективе. Однако в 104

условиях российской экономической и политической нестабильности необходимо искать также альтернативные варианты работы предприятия с целью снижения риска неполучения судостроительных заказов.

В ходе проведенного исследования было установлено, что судостроительное предприятие располагает многопрофильным оборудованием, способным выпускать разнообразную продукцию как судостроительного, так и не судостроительного характера, в т.ч. без дополнительных капиталовложений. Результаты аппроксимации позволили построить кривую зависимости рентабельности судостроительного предприятия от уровня его диверсифицированности, свидетельствующие о снижении эффективности деятельности по мере удаления от основного продукта, под производство которого максимально

адаптированы производственные мощности предприятия. На основе полученных данных были определены основные рыночные и экономические ограничения, обуславливающие выбор стратегии развития судостроительного предприятия. Как результат предложены основные этапы, реализация которых позволит судостроительному предприятию выбрать наиболее подходящую стратегию освоения новых рынков сбыта, что в свою очередь приведет к увеличению загрузки производственных площадей, снижению несистематических рисков и повышению эффективности деятельности предприятия в целом.

#### Литература

1. Аронов, А.М., Петров, А.Н. Диверсификация производства: теория и стратегия развития, – СПб.: Лениздат, 2000, 126 с.
2. Гоголюхина М.Е. Диверсификация производств судостроительного предприятия // Сб. трудов Научно-технической конференции «Кораблестроение и кораблестроительное образование 2003», – СПб.: Из-во СПбГМТУ, 2003, 111-117 с.
3. Туричин Г.А., Гоголюхина М.Е., Мамедова Л.Э. Инновационные лазерные технологии на судостроительном производстве: экономические, технологические и организационные аспекты // Азимут научных исследований: экономика и управление, 2018. Вып.4
4. Gogoljuchina M. Diversifikation als eine Alternative für russische Industriebetriebe (на немецком языке) // Maritime Systeme und Prozesse Beiträge aus dem Leonhard-Euler-Programm 1999/2000; Под ред.: B.P.Lampe; Rostock, 2001, 113-119 с.
5. Schuele, F. Diversifikation und Unternehmenserfolg: eine Analyse empirischer Forschungsergebnisse (на немецком языке), – Wiesbaden: Gabler, 1992, 163 с.
6. Jacobs, S. Strategische Erfolgsfaktoren der Diversifikation (на немецком языке), – Wiesbaden: Gabler, 1992, 256 с.
7. Döhmen, H. Anlässe, Ziele und Methodik der Diversifikation: dargestellt am Beispiel einer Unternehmung der Asphaltindustrie (на немецком языке), – Bergisch Gladbach: Gabler, 1991, 257 с.
8. Гоголюхина М.Е. Методики определения степени диверсифицированности предприятия // Сб. трудов Научно-технической конференции «Кораблестроение и кораблестроительное образование 2003», – СПб.: Из-во СПбГМТУ, 2003, 117-121 с.

#### References

1. Aronov, A.M., Petrov A.N. Diversifikacia proizvodstva: teoria i strategija razvitiya, – SPb.: Lenizdat, 2000, 126 p.
2. Gogolukhina M.E. Diversifikacia proizvodstv sudostroitel'nogo predpriyatia // Sbornik trudov Nauchno-technicheskoy konferencii "Korablestroenie i korablestroitel'noe obrazovanie 2003", – SPb.: Izdatelstvo SPbGMTU, 2003, 111-117 p.
3. Turichin G.A., Gogolukhina M.E., Mamedova L.E. Innovacionnye lasernye tehnologii na sudostroitel'nom proizvodstve: ekonomicheskie, technologicheskie i organizacionnye aspekty // Azimut nauchnykh issledovaniy: ekonomika i upravlenie, 2018. №4.
4. Gogoljuchina M. Diversifikation als eine Alternative für russische Industriebetriebe // Maritime Systeme und Prozesse Beiträge aus dem Leonhard-Euler-Programm 1999/2000; E.: B.P.Lampe; Rostock, 2001, 113-119 p.
5. Schuele, F. Diversifikation und Unternehmenserfolg: eine Analyse empirischer Forschungsergebnisse, – Wiesbaden: Gabler, 1992, 163 p.
6. Jacobs, S., Strategische Erfolgsfaktoren der Diversifikation, – Wiesbaden: Gabler, 1992, 256 p.
7. Döhmen, H. Anlässe, Ziele und Methodik der Diversifikation: dargestellt am Beispiel einer Unternehmung der Asphaltindustrie, – Bergisch Gladbach: Gabler, 1991, 257 p.
8. Gogolukhina M. Metodiki opredeleniya stepeni diversificirovannosti predpriyatia // Sbornik trudov Nauchno-technicheskoy konferencii "Korablestroenie i korablestroitel'noe obrazovanie 2003", – SPb.: Izdatelstvo SPbGMTU, 2003, 117-121 p.

УДК 621.642.3

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОРТОВЫХ ТОПЛИВНЫХ ТЕРМИНАЛОВ

**Алия Рафаэлевна Хуснуллина**

аспирант кафедры экологии промышленных зон и акваторий  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
e-mail: h.aliya@list.ru

### Аннотация

В статье приведены данные об основных портовых сооружениях, предназначенных для перекачки, накопления и хранения судового топлива, смазочных материалов, льяльных и балластных вод, а также различных нефтепродуктов. Приведены данные о практике использования методов укрепления слабых оснований.

С целью предупреждения миграции загрязнений, рассматривается возможность использования тампонажных составов, используемых в практике ведения геологоразведочных работ для ликвидации поглощений промывочной жидкости и кольматации каналов фильтрации, как материала для строительства противотранспортиционных экранов. Рассматриваются определяющие свойства вязкоупругих составов, практика применения, анализируется возможность использования данных составов для защиты прибрежных зон, путем локализации возможных загрязнений нефтепродуктами, посредством сооружения непроницаемого экрана в прилегающих грунтах по всему контуру резервуарных парков, нефтеналивных терминалов других портовых сооружений.

**Ключевые слова:** нефтепродукты, резервуары, нефтеналивные терминалы, вязкоупругие составы, геоэкологические экраны.

## ENSURING ECOLOGICAL SAFETY OF SEA AQUATORIES WHEN OPERATING PORT FUEL TERMINALS

**Aliya R. Khusnullina**

Postgraduate Student, Department of Ecology of Industrial Zones and Water Areas  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: h.aliya@list.ru

### Abstract

The article presents data on the main port facilities intended for pumping, accumulating and storing marine fuel, lubricants, bilge and ballast waters, as well as various petroleum products. The data on the practice of using methods to strengthen weak foundations are given.

In order to prevent the migration of pollution, the possibility of using cement compositions used in the practice of conducting geological exploration to eliminate the absorption of flushing liquid and clogging of filtration channels as a material for construction of impervious screens is reviewed. Defining properties of viscoelastic compositions, the practice of application, analyzes the possibility of using these compounds to protect coastal zones, by localizing possible contamination with oil products, by building an impermeable screen in adjacent soils around the entire contour of tank farms, oil terminals of other port facilities, are reviewed.

**Keywords:** oil products, reservoirs, oil terminals, viscoelastic compositions, geo-ecological screens.

### Введение

Посредством морских и речных перевозок в Российской Федерации перевозятся до 13% всех нефтепродуктов, в том числе горюче-смазочные материалы и судовое топливо. Основными морскими магистралями являются Каспийское, Черное, Охотское, Балтийское, Азовское и Японское моря. Главным преимуществом морского вида перевозок по сравнению, например, с железнодорожным транспортом, является:

- низкая стоимость, за счет того, что используются суда с большой грузоподъемностью;
- меньший расход топлива;

• относительно небольшой штат обслуживающего персонала.

Крупнейшими портами мощности, которых позволяют принимать танкеры с максимальной массой транспортируемого груза, до 120 тыс. тн: Туапсе, Приморск, Новороссийск и другие.

Для швартовки и налива нефтепродуктов в танки нефтеналивных судов оборудуются специальные причальные сооружения – нефтеналивные терминалы.

Нефтеналивные терминалы используются с целью приема сырой нефти и различных нефтепродуктов из нефтепродуктопроводов и



нефтепроводов, перегрузки их в танкеры для дальнейшего транспортирования.

Помимо перегрузки и хранения нефтепродуктов, нефтяные терминалы выполняют дополнительные функции, такие как:

- приём и обезвреживание парогазовых смесей из нефтяных танков судов;
- бункеровку на суда мазута, дизельного топлива для энергосиловых установок;
- прием с судов льяльных и балластных вод;
- погрузку пресной воды для хозяйственно-бытовых нужд и др.

К категории терминалов также относят специализированные склады на территории портов, предназначенные для перегрузки наливных грузов с сухопутного транспорта на морской или речной транспорт.

Можно выделить ряд основных видов нефтяных терминалов:

- склады с готовой продукцией нефтеперерабатывающих, нефтедобывающих предприятий;
- склады предприятий, занимающихся торговлей нефтепродуктами;
- склады сырья энергетических и нефтеперерабатывающих предприятий;
- склады вспомогательных материалов различных промышленных предприятий;
- перевалочные терминалы на территории портов, морских, речных.

Терминалы для нефтепродуктов на территории речных портов функционируют аналогично морским портам. Основным отличием является то, что при отсутствии навигации в зимний период, на территории речных портов, на перевалочных пунктах создаются межнавигационные запасы нефти и нефтепродуктов, для этих целей сооружаются крупные резервуарные парки, предназначенные для длительного хранения нефтепродуктов.

Состояние экологической защищенности морских и речных акваторий является одной из приоритетных задач при эксплуатации судов, оборудования и технологических сооружений на территории портов и нефтеналивных терминалов. При этом обустройство инженерной защиты прибрежных зон на территории морских портов осложняется наличием агрессивной среды – морской воды, которая уменьшает вероятность успешной реализации большинства из имеющихся способов укрепления слабых оснований, в которых производится строительство технологических сооружений, предназначенных для хранения судового топлива и других нефтепродуктов.

**Обеспечения экологической безопасности прибрежных зон**

В настоящее время существует множество способов обеспечения экологической безопасности прибрежных зон, в том числе использование различных методов укрепления грунтов, которые можно разделить на три группы: физические методы, механические методы и химические методы (Таблица 1).

Каждый из перечисленных методов имеет ряд существенных достоинств и недостатков, выбрать один метод как оптимальный, не представляется

возможным, с этой целью используют комбинацию методов, основная цель которых предотвращение загрязнений от локальных источников. Использование перечисленных методов для гидроизоляции всей площади резервуарного парка или нефтеналивного терминала, мероприятие трудоемкое и дорогостоящее.

Таблица 1

**Методы увеличения несущей способности грунтов**

Физическое закрепление грунтов	Механическое закрепление грунтов	Химическое закрепление грунтов
1	2	3
Термическое Замораживание Оттаивание Электроосмос Замачивание Понижение уровня грунтовых вод	Уплотнение	Силикатизация Смолизация Струйная цементация Битумизация Укрепление грунта с использованием добавок

Каждый из перечисленных методов имеет ряд существенных достоинств и недостатков, выбрать один метод как оптимальный, не представляется возможным, с этой целью используют комбинацию методов, основная цель которых предотвращение загрязнений от локальных источников. Использование перечисленных методов для гидроизоляции всей площади резервуарного парка или нефтеналивного терминала, мероприятие трудоемкое и дорогостоящее.

**Тампонажные составы и технология их применения**

Для проведения работ по изоляции загрязнений от резервуарных парков возможно использование составов, используемых в практике ведения буровых работ для ликвидации поглощений.

С этой целью используется материал, представляющий собой тонкодисперсионное вещество, которое, при контакте с водой, образует когуляционную структуру, с течением времени переходящие в твердеющие и нетвердеющие системы [1,3].

Существует ряд структурообразующих составов, которые можно разделить на группы по способу образования структуры:

1. К первой группе можно отнести составы на основе гипсовых и магнезиальных веществ, способных набирать структуру только на открытом воздухе;

2. Ко второй группе относятся составы на основе портландцемента и его разновидностей, такие составы способны набирать структуру, как на открытом воздухе, так и в воде. Недостатком данных веществ является недостаточная прочность и пористость полученного цементного камня.

3. Третья группа – составы, способные набирать структуру только при определенных условиях: высокие температуры, давления. К данному типу веществ относят шлакопесчаные, известково-кремнеземистые и другие подобные составы.

4. К четвертой группе можно условно отнести вязкоупругие составы, которые с течением времени не твердеют. Основной задачей таких составов является кольматации каналов фильтрации в проницаемых трещиноватых горных породах. Создание эффективного экрана возможно путем регулирования свойств тампонажных составов, за счет ввода реагентов [2].

По составу представляют собой сухие, либо пастообразные смеси минерального вяжущего вещества и различных добавок. При контакте с технологическими жидкостями (водой, буровым промысловым раствором) образуется тампонажный раствор, состав которого определяется водотвердым (В/Т) отношением, то есть отношением массы технологической жидкости к массе твердого вещества.

**Определяющими свойствами тампонажных составов являются:**

- кольматирующая способность;
- стабильность, отсутствие седиментации;
- хорошая адгезия с гонными породами;
- невосприимчивость к перепаду температур;
- возможность вступать в реакцию с различными реагентами при регулировании свойств составов;
- неразбавляемость водой.

При выборе компонентов тампонажного состава определяющими факторами является: стоимость, доступность, отсутствие негативного влияния на окружающую среду.

Тампонажные вязкоупругие составы характеризуются высокой проникающей способностью, как правило, изготавливаются на водной основе с добавлением полиакриламида, различных смол, полисахаридов и других вяжущих материалов [2,4].

**Вязкоупругие составы применяются с целью:**

- изоляции от грунтовых вод технических сооружений, тоннелей, коллекторов, жилых и производственных зданий;
- создания защитных экранов предотвращающих воздействие на элементы конструкций агрессивных сред;
- создания защитного экрана на объектах питьевого и промышленного водоснабжения от воздействия промышленных объектов;
- предотвращения поглощений промысловой жидкости и т.д. [2,4].

Вследствие того, что большинство применяемых на практике вязкоупругих смесей изготавливаются на водной основе, поступающие в систему пластовые воды, буровая промысловая жидкость легко разбавляют такой состав. Время, отведенное для затвердевания и набора структуры, увеличивается, либо материал уносится в поглощающие горизонты потоком жидкости. В данном случае процесс тампонирувания приходится проводить повторно, что увеличивает стоимость буровых работ.

Конечной задачей, при изоляции зон поглощения твердеющими составами, является создание цементного камня с прочностью идентичной прочности разбуриваемой горной породы. Основной целью применения нетвердеющих составов является закупорка каналов фильтрации и

восстановление непроницаемости сооружений путем создания непроницаемого экрана.

Альтернативным, может стать способ обработки цементными композициями, но с течением времени цементный камень разрушается, особенно при наличии агрессивных сред, в данном случае, возможное поступление фильтрата морской воды. Кроме того, для районов крайнего севера, для которых характерны перепады температур в зимний и летний периоды, необходимо рассматривать риск появления трещин в искусственно созданном массиве и, соответственно, возобновление фильтрации.

Решением вышеперечисленных проблем может стать технология создания противотрещинных экранов на основе вязкоупругих составов. Технология производства работ, позволит восстанавливать гидроизоляции оснований уже эксплуатируемых технологических емкостей при капитальном и текущем ремонтах.

Можно предположить, что определяющие свойства вязкоупругих составов позволяют:

- за счет кольматирующей способности и неразбавляемости водой, создать двусторонний экран, не пропускающий загрязнения в окружающую среду при разгерметизации емкости, и препятствующий поступлению жидкости внутрь емкости;
- за счет того, что конечный продукт является нетвердеющим, создавать экраны в сейсмически-активных зонах, так как вязкоупругие составы являются нетвердеющими;
- за счет невосприимчивости к перепадам температур, использовать составы в зонах, сложенных многолетнемерзлыми породами;
- за счет хорошей адгезии с горными породами создавать устойчивые экраны, которые не будут вымываться из порового пространства с течением времени;
- вязкоупругие составы вступают в реакцию с различными составами, за счет этого возможно регулирование свойств [3].

**Создание противотрещинных экранов для защиты прибрежных зон**

Для создания противотрещинных экранов, как правило, используют два способа:

1. ручная укладка материала в подготовленные траншеи с последующим трамбованием. Существенным недостатком данного способа является трудоемкость процесса, кроме того, в случае, если участок фильтрации находится под емкостью, необходим комплекс мероприятий по демонтажу конструктивных элементов, что значительно увеличит сроки и стоимость производства работ;

2. бурение скважин с последующим инъецированием составов через специально изготовленные колонны. Данный способ является наиболее эффективным, поскольку позволит выполнить работу в кратчайшие сроки, не требуется специальных подготовительных работ, технология бурения наклонных скважин позволит проводить работы под днищем емкости без демонтажа конструктивных элементов.

При работе с вязкоупругими составами, наиболее эффективным способом является инъецирование составов, данный способ позволит:

1. доставлять состав в грунты под давлением, за счет чего возможно создание плотного непроницаемого экрана, который не вымоется из грунтов при поступлении фильтрата;
2. сократить временные затраты на доставку состава в зону фильтрации;

3. позволит проводить работы в труднодоступных местах и в условиях ограниченного пространства;

4. сократить стоимость работ за счёт того, что работы по инъецированию возможно проводить одной буровой бригадой.

#### Литература

1. Нифонтов, Ю.А. и др. Осложнения и аварии при бурении нефтяных и газовых скважин. Моделирование аварий при бурении / Ю.А. Нифонтов, Е.В. Суетина, П.А. Блинов, В.П. Онищин, Н.И. Николаев, П.Н. Дмитриев // СПб: СПГГИ (ТУ), 2004, 40 с.
2. Нифонтов, Ю.А. и др. Комплекс полимерных буровых реагентов нового поколения / Ю.А. Нифонтов, А.Г. Петропавловский // Промышленность сегодня, № 6 (98), СПб, 2003, С. 11.
3. Нифонтов, Ю.А. и др. Применение специальных промывочных жидкостей при проходке бурением четвертичных отложений Воркутского угольного месторождения / Ю.А. Нифонтов, П.А. Блинов, Н.И. Герасименко // Народное хозяйство Республики Коми, т. 12, № 4, Воркута-Сыктывкар-Ухта, 2003, - С. 255-258.
4. Рафиенко, И.И. Эффективные методы ликвидации поглощений промывочной жидкости при бурении / И.И. Рафиенко. - М.: Недра, 1967. – С. 11-18.

#### References

1. Nifontov, Yu.A., etc. Complications and accidents when drilling oil and gas wells. Modeling of accidents when drilling / Yu.A. Nifontov, E.V. Suetina, P.A. Blinov, V.P. Onishchin, N.I. Nikolaev, P.N. Dmitriyev//SPb.: SPGGI (TU), 2004, 40 pages.
2. Nifontov, Yu.A., etc. Complex of polymeric boring reagents of new generation / Yu.A. Nifontov, A.G. Petropavlovsky//Industry today, No. 6 (98), SPb, 2003, S. 11.
3. Nifontov, Yu.A., etc. Use of special flushing liquids at a driving drilling of quarternary deposits of the Vorkutsky coal field / Yu.A. Nifontov, P.A. Blinov, N.I. Gerasimenko//the National economy of the Komi Republic, t. 12, No. 4, Vorkuta-Syktvykar-Ukhta, 2003, - Page 255-258.
4. Rafiyenko, I.I. Effective methods of elimination of absorption of flushing liquid during the drilling / I.I. Rafiyenko. - M.: Subsoil, 1967. – Page 11-18

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

УДК 621.311

**СУДОВАЯ ЕДИНАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА  
С МНОГОУРОВНЕВЫМИ ИНВЕРТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЯ****Александр Сергеевич Корнев**

доктор технических наук, профессор  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: alex\_kornev46@mail.ru

**Виктор Иванович Кузнецов**

кандидат технических наук, начальник управления  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: kuznetsov-spb@bk.ru

**Алексей Петрович Сеньков**

доктор технических наук, профессор  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: senkov@smtu.ru

**Виктор Викторович Червяков**

доктор технических наук, профессор, генеральный директор  
ЗАО НПО «ВОЛС»  
191186, Санкт-Петербург, Невский пр., 44  
e-mail: v\_chervyakov@mail.ru

**Аннотация**

В статье рассмотрен вариант построения судовой электроэнергетической системы (СЭЭС), обладающей по сравнению со схемой СЭЭС фирмы «Siemens» большим КПД, а также сниженным расходом топлива при эксплуатации. В составе преобразователей частоты, управляющих гребными электродвигателями, используются 12-пульсные выпрямители, которые получают питание от согласующих трансформаторов, имеющих две пары вторичных обмоток. На выходе преобразователей частоты установлены трехуровневые инверторы напряжения, которые обеспечивают высокое качество напряжения питания гребными электродвигателями. Две структуры СЭЭС были сопоставлены с помощью моделирования в пакете MATLAB Simulink. Результаты моделирования показывают, что в СЭЭС с трехуровневым инвертором в составе преобразователя частоты качество питания гребных электродвигателей на номинальной мощности, а также в долевых режимах, существенно выше, чем в СЭЭС фирмы «Siemens». Это позволяет повысить КПД гребной электрической установки и снизить расход топлива.

**Ключевые слова** 12-пульсный выпрямитель, многоуровневый инвертор напряжения, гребная электрическая установка, пропульсивный трансформатор.

**SHIP-SINGLE UNIFIED ELECTRICAL POWER SYSTEM WITH MULTILEVEL  
VOLTAGE INVERTERS****Aleksandr S. Kornev**

Dr.Sci.Tech, professor  
State Marine Technical University of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: alex\_kornev46@mail.ru

**Viktor I. Kuznetsov**

PhD, head of department  
State Marine Technical University of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: kuznetsov-spb@bk.ru

**Aleksey P. Sen'kov**

Dr.Sci.Tech, professor  
State Marine Technical University of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: senkov@smtu.ru

**Viktor V. Chervyakov**

Dr.Sci.Tech, professor, general director  
CJSC "VOLS"  
Nevsky prospect, 44, St. Petersburg 191186, Russian Federation  
e-mail: v\_chervyakov@mail.ru

**Abstract**

The article considers a variant of construction of the ship electric power system (SEES), which has a high efficiency as compared to the Siemens circuit of the SEES, and also low fuel consumption during operation. As part of the frequency converters that control propulsion motors, 12-pulse rectifiers are used, which are powered by matching transformers having two pairs of secondary windings. At the output of frequency converters, three-level voltage inverters are installed, which ensure high quality of supply voltage by propulsion motors. Two SEEA structures were compared using modeling in the MATLAB Simulink package. The simulation results show that in the SEEA with a three-level inverter as part of the frequency converter, the quality of supply of propulsion motors at rated power, as well as in shared modes, is significantly higher than in the SEEA of Siemens. This makes it possible to increase the efficiency of the propulsion system and reduce fuel consumption.

**Key words** 12-pulse rectifier, multi-level voltage inverter, electric propulsion system, propulsion transformer.

**Введение**

Современные системы электродвижения (СЭД) судов позволяют существенно повысить безопасность плавания за счет повышения надежности гребных установок и маневренности судов. Кроме того, СЭД дают возможность сократить объем машинного отделения, более рационально разместить судовое оборудование, обеспечить снижение уровней шумов и вибраций.

В настоящее время СЭД нашли применение на судах практически всех видов – пассажирских лайнерах, буксирах, паромах, танкерах, буровых платформах, судах снабжения и т.д. Созданы надводные корабли с СЭД, в том числе авианосцы. Мощность судовой электростанции на крупнейших судах и кораблях с СЭД - ледоколах, пассажирских лайнерах и авианосцах составляет около 100 МВт.

Характерными чертами современных систем электродвижения являются единая электроэнергетическая система (ЕЭЭС) судна, гребные электродвигатели переменного тока, управляемые с помощью полупроводниковых преобразователей частоты, и изменяемое направление тяги гребного винта.

ЕЭЭС обеспечивает электроэнергией и гребные электрические установки (ГЭУ), и многочисленные общесудовые потребители. При этом ГЭУ - основной потребитель электроэнергии, суммарная мощность ГЭУ может составлять до 75% от мощности судовой электростанции.

Полупроводниковые преобразователи частоты в составе ГЭУ являются для судовой сети нелинейной нагрузкой большой мощности, которая может создать существенные искажения напряжения судовой сети, способные вызвать отказы общесудовых потребителей.

Проблема обеспечения электромагнитной совместимости ГЭУ и общесудовых потребителей является одной из основных при проектировании ЕЭЭС.

**1. Структура ЕЭЭС фирмы «Siemens AG»**

Удачно решена проблема электромагнитной совместимости ГЭУ и общесудовых потребителей в структуре ЕЭЭС, разработанной специалистами фирмы «Siemens» [1] (рисунок 1).

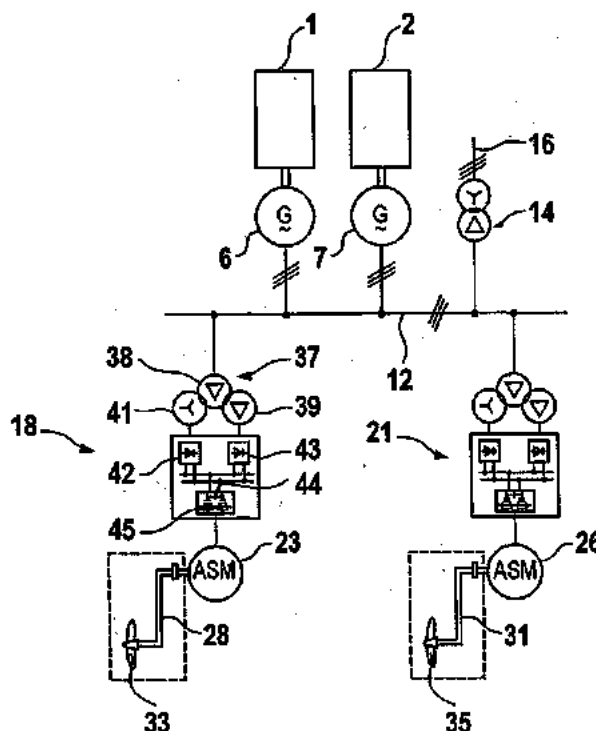


Рис. 1. Схема ЕЭЭС фирмы «Siemens»

В состав ГЭУ входит трехфазный пропульсивный трансформатор (ПТ, на рисунке 1 поз. 37), имеющий две вторичные обмотки (поз. 39, 41), одна из которых соединена по схеме звезда, а другая по схеме треугольник. На выходе вторичных обмоток ПТ получаются две системы трехфазных напряжений, смещенных по фазе на 30 электрических градусов (30°e). Напряжения со вторичных обмоток ПТ поступают на трехфазные мостовые выпрямители (поз. 42, 43) и преобразуются в постоянные напряжения. Выпрямленные напряжения на выходе выпрямителей суммируются и поступают на вход автономного инвертора (поз. 45), который вырабатывает переменное напряжение с управляемой амплитудой и частотой, поступающее на гребной электродвигатель (поз. 23).

Структура ЕЭЭС фирмы «Siemens» обладает двумя достоинствами. Во-первых, выпрямленное двенадцатипульсное напряжение на входе инвертора позволяет получить хорошее качество напряжения питания гребного двигателя. Во-вторых, применение в составе ГЭУ ПТ с двумя вторичными обмотками дает возможность компенсировать

гармоники высокого порядка в потребляемом первичной обмоткой ПТ токе и обеспечить малые искажения напряжения судовой сети.

Свойства ЕЭЭС исследовались на компьютерной модели электроэнергетической системы гидрографического судна «Вайгач», на котором ЕЭЭС построена по схеме фирмы «Siemens». Параметры основных компонентов судна «Вайгач» [2]: синхронный генератор (1,0МВт, 400В, 50Гц), пропульсивный трансформатор (800кВА, 400В/550В;550В), преобразователь частоты с 12-пульсным выпрямителем и двухуровневым АИН, гребной электродвигатель (550кВт, 960В, 1500 об/мин.). На рисунке 2 показаны полученные на модели кривые токов в фазах вторичных обмоток ПТ, потребляемые трехфазными выпрямителями, и токи в фазах первичной обмотки ПТ. Кривые токов получены при мощности ГЭУ, составляющей 60% от мощности судовой электростанции.

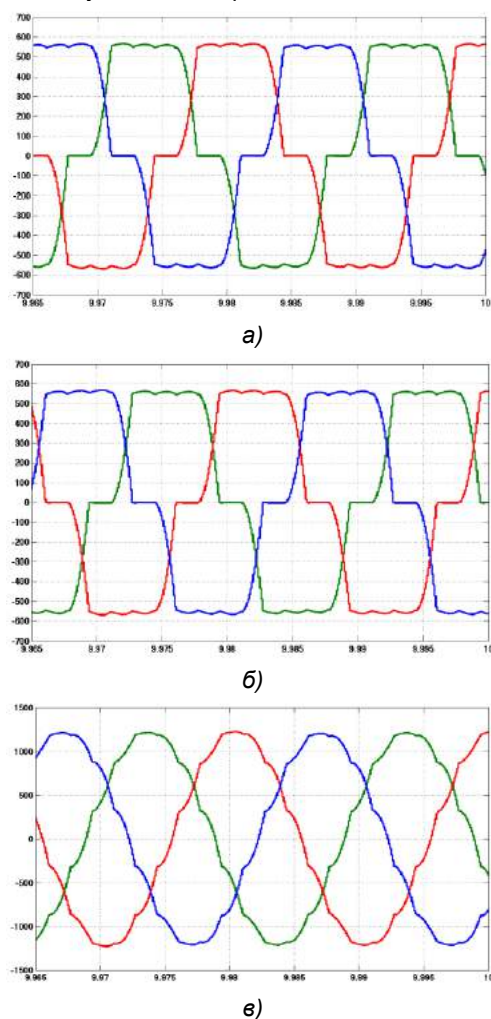


Рис. 2. Токи в фазах вторичных обмоток ПТ, соединенных звездой (а) и треугольником (б), и в фазах первичной обмотки (в) ЕЭЭС судна «Вайгач».

Как видно из графиков 2а и 2б, токи, потребляемые выпрямителями и протекающие во вторичных обмотках ПТ, имеют значительные искажения, коэффициент несинусоидальности этих токов составляет около 20%. Кроме основной гармоники токи вторичных обмоток содержат значительную долю гармоник высокого порядка, наибольшие из

которых пятая гармоника, амплитуда которой составляет более 16% от основной гармоники, и седьмая, амплитуда которой превышает 9% от основной.

Каждая гармоническая составляющая токов вторичных обмоток создает в магнитопроводе трансформатора соответствующие составляющие магнитных потоков, и магнитные потоки, созданные двумя вторичными обмотками, суммируются. Первые гармоники токов и магнитных потоков смещены на 30° и суммируются с коэффициентом  $\cos 15^\circ = 0,97$ . Пятые гармоники токов и магнитных потоков смещены на 150° и суммируются с коэффициентом  $\cos 75^\circ = 0,26$ . Седьмые гармоники токов и магнитных потоков смещены на 210° и суммируются с коэффициентом  $\cos 105^\circ = -0,26$ . В результате доля гармоник высокого порядка в суммарном магнитном потоке, созданным в магнитопроводе ПТ вторичными обмотками, и следовательно в электродвижущей силе, созданной этим магнитным потоком в первичной обмотке ПТ, намного меньше, чем доля гармоник в токах вторичных обмоток.

Благодаря компенсации гармоник высокого порядка коэффициент несинусоидальности токов в первичной обмотке трансформатора составляет всего 3,7% (рисунок 2в). В результате качество напряжения судовой сети, несмотря на нелинейную нагрузку большой мощности, обеспечивается достаточно высоким. В модели ЕЭЭС судна «Вайгач» коэффициент несинусоидальности при заданной выше нагрузки составляет 8,2%, что хорошо согласуется с результатами экспериментальных измерений [2].

Структура ЕЭЭС фирмы «Siemens» широко применяется судостроительными предприятиями разных стран. На судах Российского флота по этой схеме построены ЕЭЭС спасателей типа «Игорь Белоусов», танкеров «Михаил Ульянов», «Кирилл Лавров», ледокола проекта 22220 и других судов. На судах иностранного флота по структуре «Siemens» построены ЕЭЭС пассажирских судов «Norwegian Epic», «Costa Victoria», «Fram», паромов «Schleswig-Holstein», «Deutschland», а также многих других судов.

## 2. Недостатки ЕЭЭС фирмы «Siemens AG»

Одной из актуальных проблем при эксплуатации судов с СЭД является проблема больших эксплуатационных расходов, по сравнению с традиционными пропульсивными комплексами, поскольку суда с СЭД обладают меньшим КПД, что ведет к увеличению затрат на топливо. На судах с электродвижением основным потребителем электроэнергии является СЭД. Поэтому необходимо строить ЕЭЭС таким образом, чтобы минимизировать потери в составных частях СЭД.

В схеме фирмы «Siemens» в составе каждого преобразователя частоты, которые питают асинхронные ГЭД, используется 12-пульсный выпрямитель и двухуровневый автономных инвертор напряжения. В спектре напряжения на выходе такого инвертора содержится не только основная гармоника, но и гармоники более высокого порядка. Наличие высокочастотных гармоник в спектре тока, протекающего в фазах ГЭД, ведет к увеличению потерь в обмотках и магнитопроводе. Высокие

потери в ГЭД приводят к снижению КПД и повышенному нагреву электрической машины, что снижает срок ее службы, а также повышают эксплуатационные расходы.

Одним из направлений совершенствования ЕЭЭС является внедрение в состав СЭД преобразователей частоты на базе многоуровневых инверторов напряжения [3]. На рисунке 2 представлена схема силовой части трехуровневого автономного инвертора напряжения.

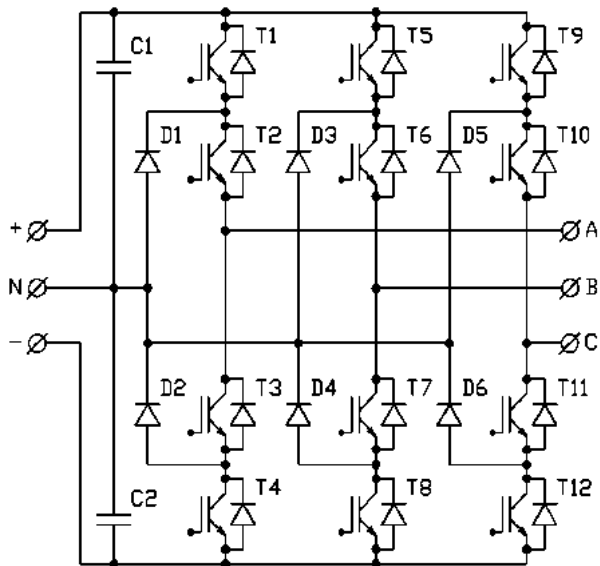


Рис. 2. Силовая часть трехуровневого АИН

В схеме трехуровневого АИН содержится 12 силовых ключей, что в два раза больше по сравнению с двухуровневым АИН. Однако максимальные токи ключей соответственно в два раза ниже, а качество напряжения на выходе трехуровневого АИН значительно выше, чем на двухуровневом АИН.

Для функционирования многоуровневых инверторов необходимы гальванически не связанные источники постоянного тока, которые обычно получают с помощью трансформаторов, имеющих несколько трехфазных вторичных обмоток, напряжения с которых подается на соответствующее число выпрямителей. В составе СЭД фирмы «Siemens» трансформаторы уже есть и введение на них дополнительных вторичных обмоток несущественно усложняет структуру ЕЭЭС.

### 3. Судовая ЕЭЭС с трехуровневым АИН

На рисунке 3 приведена схема ЕЭЭС, в которой на ПТ размещены две дополнительные вторичные обмотки и в составе ПЧ используется трехуровневый инвертор напряжения.

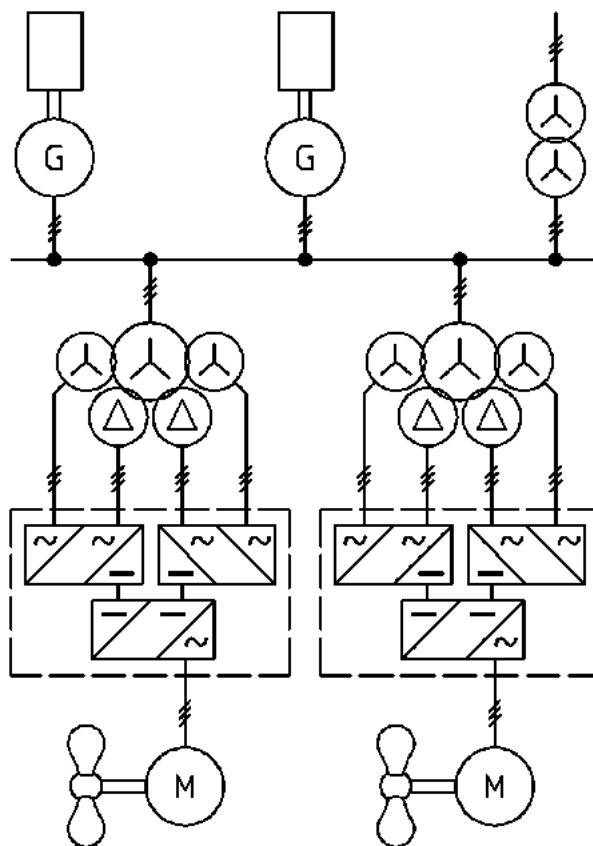


Рис. 3. Судовая ЕЭЭС с трехуровневым АИН

В схеме по рисунку 3, каждый ГЭД подключается к выходу ПЧ. Каждый ПЧ состоит из двух 12-пульсных выпрямителей и трехуровневого АИН. Для питания двух 12-пульсных выпрямителей каждого ПЧ используется ПТ, у которого две пары вторичных обмоток, соединенные в звезду и треугольник подключаются к входам 12-пульсных выпрямителей. При этом на входы одного 12-пульсного выпрямителя подключаются обмотки со схемами соединения звезда и треугольник.

Существуют и другие способы применения трехуровневых АИН в составе ЕЭЭС [4,5,6]. Данные способы предусматривают применение в качестве источников электроэнергии – электрических машин, на статоре которых располагаются две и более гальванически развязанные трехфазные обмотки, что позволяет вовсе исключить ПТ из ЕЭЭС.

По структурной схеме ЕЭЭС фирмы «Siemens», а также схеме ЕЭЭС с трехуровневым АИН разработаны компьютерные модели в пакете MATLAB Simulink. В ходе моделирования режимов ЕЭЭС производилась оценка качества напряжения для общесудовых потребителей, а также качество тока в фазах гребного электродвигателя для рассмотренных выше структур ЕЭЭС. Основные результаты, полученные в процессе моделирования, содержатся в таблицах 1 и 2.



Таблица 1

## Результаты моделирования ЕЭЭС судна «Вайгач»

Наименование параметра	Значение		
1 Мощность ГЭД, % от номинального значения	100	50	10
2 Коэффициент несинусоидальности тока в фазах ГЭД, % кривой	8,37	12,7	19,1

Таблица 2

## Результаты моделирования ЕЭЭС с трехуровневым автономным инвертором напряжения

Наименование параметра	Значение		
1 Мощность ГЭД, % от номинального значения	100	50	10
2 Коэффициент несинусоидальности тока в фазах ГЭД, % кривой	4,60	6,89	12,8

Из таблиц 1 и 2 следует, что ЕЭЭС с трехуровневым АИН по рисунку 3, обеспечивает качество напряжения для общесудовой нагрузке в соответствии с требованиями РМРС, а также обеспечивает более низкие искажения формы тока в фазах

Таким образом, схема ЕЭЭС, приведенная на рисунке 3, позволяет создать более эффективную электроэнергетическую систему судна.

## Выводы

1. Применение многоуровневых автономных инверторов напряжения позволяет существенно повысить качество напряжения питания ГЭД, что позволит повысить КПД ГЭУ судна и снизить расход топлива при эксплуатации судна.

2. Многоуровневые инверторы особенно значительно повышают качество напряжения питания на частичных режимах работы ГЭД.

## Литература

1. Патент WO 02/100716, Marine propulsion system with reduced on-board network distortion factor / Iden Stefan, Vaupel Gustav, приоритет 11.06.2001, патентообладатель Siemens AG.
2. Григорьев А. В., Глеклер Е.А., Улитовский Д.И. Результаты ходовых испытаний единой электроэнергетической установки малого гидрографического судна «Вайгач» // Судостроение, 2008, №1, с. 33 – 35.
3. Лихошерст В.И. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии с импульсным регулированием. - Учеб. пособие. - Екатеринбург: ГОУ УГТУ-УПИ, 2002. - 166 с.
4. Калмыков А.Н., Кузнецов В.И., Сеньков А.П., Токарев Л.Н. Судовые бестрансформаторные гребные электрические установки // Морской вестник №1(45), 2013, с. 40-42.
5. Калмыков А.Н., Сеньков А.П., Кузнецов В.И., Сеньков А.А. Многолинейные судовые единые электроэнергетические системы на основе многофазных синхронных генераторов // Морской вестник. Специальный выпуск. 2013, № 2(11), с.21-24.
6. Патент РФ №2529090, Судовая электроэнергетическая установка / Калмыков А.Н., Кузнецов В.И., Сеньков А.П., 27.09.2014.

## References

1. Iden Stefan, Vaupel Gustav. Marine propulsion system with reduced on-board network distortion factor. Siemens AG, 11.06.2001.
2. Grigor'ev A. V., Glekler E.A., Ulitovskiy D.I. Rezul'taty khodovykh ispytaniy edinoy elektroenergeticheskoy ustanovki malogo gidrograficheskogo sudna «Vaygach». Sudostroenie, №1, 2008, 33-35.
3. Likhosherst V.I. Poluprovodnikovye preobrazovateli elektricheskoy energii s impul'snym regulirovaniem. Ekaterinburg, 2002. 166 p.
4. Kalmykov A.N., Kuznetsov V.I., Senkov A.P., Tokarev L.N. Sudovye bestransformatornye grebnye elektricheskie ustanovki. Morskoy vestnik, №1(45), 2013, 40-42.
5. Kalmykov A.N., Senkov A.P., Kuznetsov V.I., Sen'kov A.A. Mnogolineynye sudovye edinye elektroenergeticheskie sistemy na osnove mnogofaznykh sinkhronnykh generatorov. Morskoy vestnik. Spetsial'nyy vypusk, № 2(11), 2013, 21-24.
6. Kalmykov A.N., Kuznetsov V.I., Senkov A.P. Sudovaya elektroenergeticheskaya ustanovka. Patent RF № 2529090, 27.09.2014.

УДК 62-713.5, 621.039.534...24

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА НА ПРИМОРСКОЙ УЧЕБНО-НАУЧНОЙ БАЗЕ СПБГМТУ

**Анастасия Васильевна Аполлова**

старший преподаватель кафедры энергетики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: an.vas.petrova@gmail.com

**Вячеслав Вячеславович Кожемякин**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: kogh2012@yandex.ru

**Дмитрий Николаевич Шаманов**

Заведующий научно-исследовательского сектора перспективных энергетических установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: shim@smtu.ru

**Николай Павлович Шаманов**

доктор технических наук, профессор, руководитель научно-исследовательской части  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: np@smtu.ru

### Аннотация

В работе представлены сведения об экспериментальной установке «Бета-К ТСН», а также данные, полученные в ходе проведения экспериментальных исследований масштабного макета системы пассивного отвода тепла (СПОТ) с пароводяными струйными аппаратами (ПВСА) на Приморской учебно-научной базе СПбГМТУ.

Эти результаты свидетельствуют о работоспособности изучаемой схемы, о возможности использования ПВСА в качестве циркуляционного насоса в замкнутом контуре СПОТ, способности ПВСА, в составе контура СПОТ, к автоматическому запуску, самостоятельному перезапуску при срыве, запаривании и останове циркуляции. В результате проведенных исследований были получены параметры функционирования ПВСА и контура СПОТ в целом. Анализ результатов показал, что изучаемая схема СПОТ, в зависимости от количества подводимого тепла, имеет непрерывно-циклический режим работы, где длительность циклов определяется величинами подводимой и отводимой тепловой мощности.

**Ключевые слова:** экспериментальная установка, моноблочный паропроизводящий агрегат, система пассивного отвода тепла, пароводяной струйный аппарат, конструктивная безопасность.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PASSIVE HEAT REMOVAL SYSTEM AT THE PRIMORSK EDUCATIONAL AND SCIENTIFIC BASE OF ST.PETERSBURG STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY (SPBSMTU)

**Anastasia V. Apollova**

Senior Lecturer, Department of Power Engineering  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: an.vas.petrova@gmail.com

**Vyacheslav V. Kozhemyakin**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Head of the Department of Power Engineering  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: kogh2012@yandex.ru

**Dmitry N. Shamanov**

Head of the research sector of perspective power plants  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: shim@smtu.ru

**Shamanov N. Shamanov**

Dr.Sci.Tech, Professor, Head of Research  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: np@smtu.ru

**Abstract**

The paper presents information about the experimental plant "Beta-K TSN", as well as data obtained during the experimental research of a large-scale model of the passive heat removal system (PHRS) with steam-water jet devices (SWJD) at the Primorsky educational and scientific base of SPbSMTU.

These results indicate the efficiency of the studied scheme and potential of using SWJD as a circulating pump in a closed PHRS circuit, the ability of SWJD as part of a PHRS circuit to automatically start, self-restart in case of circulation breakdown, steam lock and stop. As a result of the research, the parameters of the SWJD and the whole PHRS circuit functioning were obtained. Analysis of the results showed that the studied PHRS scheme, depending on the amount of supplied heat, has a continuous-cyclic mode of operation, where the duration of the cycles is determined by the values of supplied and removed thermal power.

**Keywords:** experimental plant, monoblock steam generating unit, passive heat removal system, steam-water jet device, structural safety.

**Введение**

В настоящее время в связи с ужесточением требований к безопасности реакторных установок большое внимание уделяется развитию моноблочных паропроизводящих агрегатов (ППА) и систем пассивного отвода тепла (СПОТ).

Многочисленные эксперименты, проводимые в ЛКИ (Ленинградском кораблестроительном институте), а позднее в СПбГМТУ, направленные на оптимизацию проточной части пароводяных струйных аппаратов (ПВСА) в соответствии с требуемыми режимами работы, позволили создать ПВСА, обладающие значительным срывным напором (до 8-16 ата) при высоком (до 40-60) коэффициенте инжекции в широком диапазоне изменения параметров рабочей и инжектируемой среды – в том числе и при параметрах теплоносителя первого контура.

Использование ПВСА в первом контуре позволило разработать ППА типа «Бета», в котором циркуляция теплоносителя первого контура осуществляется за счет ПВСА [1].

Использование таких ПВСА в СПОТ позволяет создать систему, в которой принудительная циркуляция теплоносителя будет осуществляться за счет отводимого тепла.

Основным преимуществом таких систем является полная независимость от каких-либо дополнительных источников энергии. СПОТ подключается к парогенератору со стороны второго контура и, таким образом, не нарушает целостности первого контура.

ПВСА хорошо изучены теоретически и экспериментально. Это позволило разработать и обосновать несколько схем СПОТ, которые могут работать при статических характеристиках менее 20% от номинальной мощности в режиме штатного и аварийного расхолаживания.

Целью работы является экспериментальное исследование предложенных схем СПОТ, подтверждение их работоспособности в широком

диапазоне мощностей, способности ПВСА в контуре СПОТ к автоматическому запуску и повторному перезапуску после срыва.

**1. Экспериментальная установка**

Для экспериментального подтверждения работоспособности ППА типа «Бета» и проведения исследований на Приморской учебно-научной базе СПбГМТУ был создан полунатурный испытательный стенд «Бета-К» [2] и проведены всесторонние исследования [3].

В настоящее время для физического моделирования основных гидродинамических и теплофизических процессов, протекающих в СПОТ, на Приморской учебно-научной базе СПбГМТУ стенд «Бета-К» был модернизирован в масштабный стенд «Бета-К ТСН» с рабочим давлением до 1,6 МПа, при подводимых и отводимых тепловых мощностях до 100 кВт.

Стенд «Бета-К-ТСН» состоит из нескольких блоков, что позволяет быстро и без существенных затрат формировать различные схемы СПОТ. Всего на стенде «Бета-К ТСН» было исследовано 13 схем СПОТ. Наиболее перспективной была признана схема «Макет 2».

Управление стендом и считывание показаний датчиков осуществляется с помощью автоматизированной системы управления и контроля параметров «АСУ и КП».

Мнемосхема оператора, отражающая функциональную схему испытуемого объекта «Макет 2» представлена на рисунке 1.

Схема СПОТ аналогична схеме системы аварийного отвода тепла по патенту [4]. Отличие состоит в том, что емкость подсоединена ко второму циркуляционному контуру непосредственно сразу после выхода из ПВСА, а не после теплообменника – как в полезной модели. Кроме того, пусковая емкость (БОК) размещена вертикально и подсоединена к циркуляционному контуру в своей нижней части так, что в ней всегда сохраняется газовый объем.

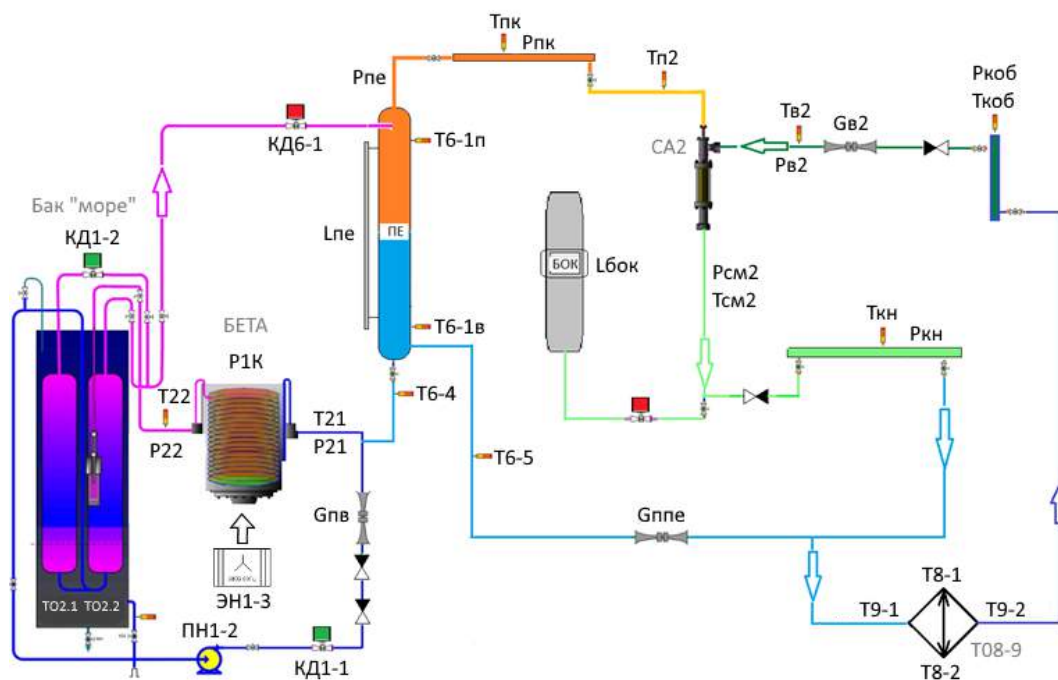


Рис. 1. – Мнемосхема оператора, отражающая функциональную схему испытуемого объекта «Макет 2» и контролируемые параметры:

ПГ «Бета» – парогенератор; ТО2.1, ТО2.2 – кассеты теплообменных аппаратов второго контура ПГ «Бета-К»; Бак «море» – емкость, предназначенная для отвода тепла от ТО2.1 и ТО2.2; ПН1-2 – питательный насос второго контура «Бета-К»; ТО8-9 – теплообменный аппарат блока ТОА; ПЕ – промежуточная емкость запаса воды блока ЕЗВ; СА2 – пароводяной струйный аппарат; БОК – баллон компенсатора объёмного расширения теплоносителя; КД1-1, КД1-2, КД6-1, КД6-2 – дистанционно управляемые клапаны; ЭН1-3 – электродный нагреватель.

## 2. Порядок проведения испытаний

Испытания реализуются в два этапа:

- этап функциональной проверки, работоспособности СПОТ при использовании насыщенного пара от парогенератора электродного;
- этап определения качественных параметров работы СПОТ в автоматическом (без вмешательства обслуживающего персонала) режиме при ступенчатом уменьшении подаваемой электрической мощности.

Все этапы осуществлялись последовательно. Испытания прекращались в случае возникновения нестандартных рабочих или аварийных режимов.

В режиме разогрева и выхода на заданные параметры испытаний, отвод тепла от парогенератора ПГ «Бета» осуществлялся через теплообменные аппараты ТО2.1, ТО2.2 в бак «море» посредством питательного насоса второго контура ПН1-2. По достижении заданных параметров испытаний, производилось отключение питательного насоса ПН1-2 и переключение дистанционно управляемой арматуры ДУК на отключение контура охлаждения ПГ через бак «море» и подключение исследуемой схемы СПОТ. Управление подводимой тепловой мощностью осуществлялось посредством автоматического или ручного управления электрической мощностью электродных нагревателей ЭН1-3. Отвод тепла от бака «море» в процессе разогрева, а также отвод тепла от теплообменных аппаратов блока ТОА осуществлялся вспомогательной системой

охлаждения. В процессе проведения испытаний макета СПОТ управление арматурой, а также регулировка СА2 обслуживающим персоналом не производилась.

По окончании выполнения подготовительных работ испытательный стенд готов к разогреву. При этом система АСУ и КП переводилась в режим процесса записи данных эксперимента. Разогрев парогенерирующего блока «Бета-К» производился до параметров, заданных условиями эксперимента: давление в первом контуре 1 МПа, температура теплоносителя 180°C. При появлении пара производилась стабилизация подводимой мощности при выключенном насосе ПН1-2. При этом давление во втором контуре увеличивалось до значений 0,4-0,47 МПа(и).

Затем инициируется пуск ПВСА открытием ДУК. При корректном функционировании СПОТ, это приведет к запуску ПВСА. Включившийся ПВСА начнет прокачку теплоносителя по тракту теплообменника, возвращая при этом массу воды, равную массе потребленного пара обратно в ПЕ. При недостаточном уровне теплоотвода уровень в ПЕ начнет уменьшаться, а расход теплоносителя, обеспечиваемый струйным аппаратом – увеличиваться. При превышении (даже незначительном) отводимой мощности над подводимой, будет происходить постепенное заполнение емкости ПЕ водой и уменьшение температуры воды в емкости ПЕ. В случае полного заполнения ПЕ водой, произойдет срыв циркуляции

ПВСА вследствие заливания парового сопла водой. Останов циркуляции приведет к уменьшению теплоотвода от ПЕ, и уровень в ней начнет понижаться. Причем вода из ПЕ будет вытесняться по тракту в БОК. Паровое сопло будет освобождаться от воды, и произойдет автоматический перезапуск СА2.

Рисунок, отражающий проведение всего цикла испытания и характер изменения параметров сред, приведен на рисунке 2.

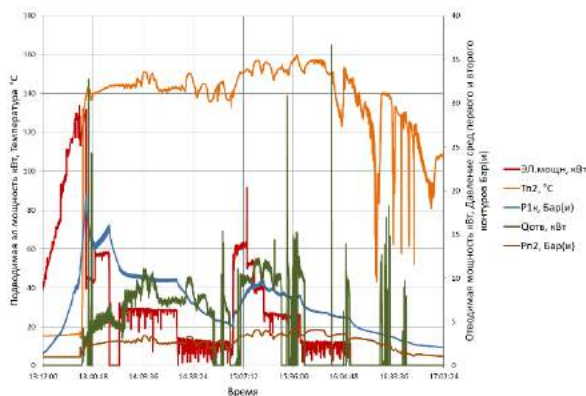


Рис. 2 – Полный цикл испытания и характер изменения параметров сред

### 3. Результаты испытаний

В испытываемой схеме под действием напора создаваемого струйным аппаратом СА2, циркуляция

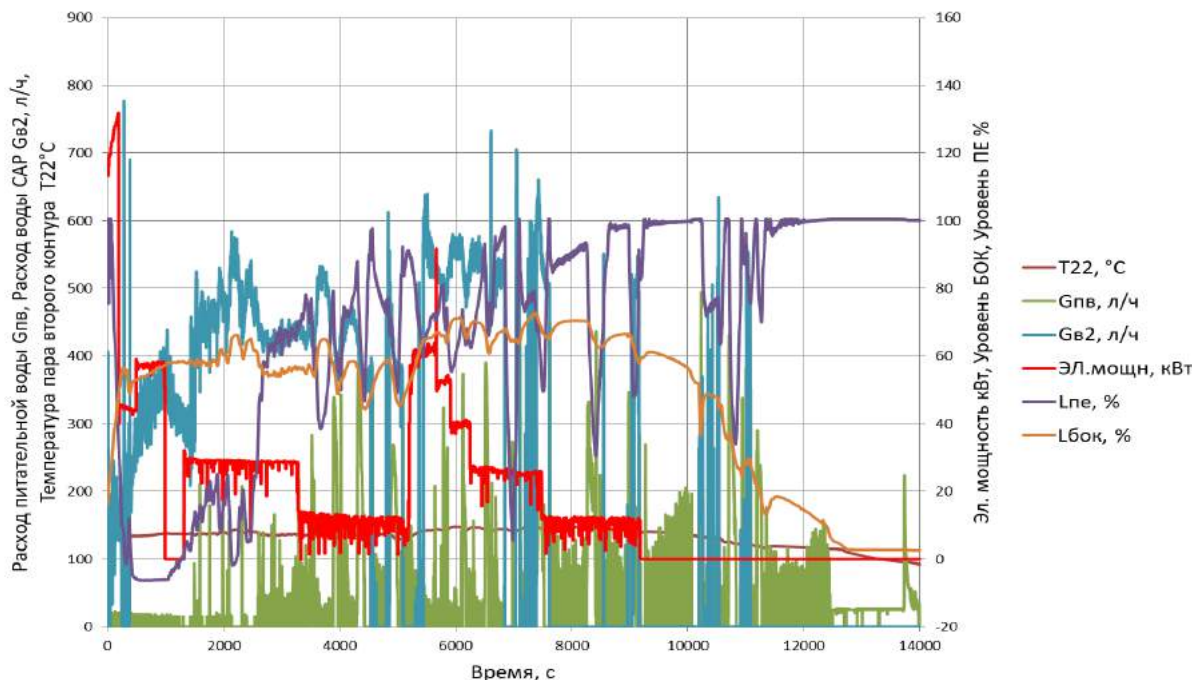


Рис. 3 – Характер изменения мощности, расходов и уровней воды в емкостях на протяжении рабочего цикла испытаний

Из рисунка видно, что на мощностях выше 25кВт, циркуляция создаваемая напором СА2 не останавливается и сопровождается периодическим поступлением питательной воды в ПГ. При поступлении воды в парогенератор температура пара T22 на выходе ПГ снижается, возвращаясь затем в исходное состояние. На больших мощностях

может происходить по трем замкнутым циркуляционным трактам. Первый – включает парогенератор ПГ, промежуточную емкость ПЕ и струйный аппарат СА2. Циркуляция по этому контуру возможна, когда напора СА2 достаточно на прокачку теплоносителя через ПГ при заполненной ПЕ. Второй тракт включает только промежуточную емкость ПЕ и струйный аппарат. Третий тракт – теплоотводящий циркуляционный – включает СА2 и теплообменник. Циркуляция по этому тракту возможна только под действием напора создаваемого СА2. На рисунке 3 показаны результаты наиболее характерного рабочего цикла испытаний, где представлен характер изменения температуры пара на выходе ПГ T22, расходов питательной воды Gпв, расхода, создаваемого СА2 Gв2, а также изменения уровней теплоносителя в ПЕ и объемном компенсаторе БОК. Как видно из рис. 3, изменения расходов питательной воды и расход в третьем тракте имеют циклический периодический характер. Происходит процесс, сопровождаемый изменениями в уровнях ПЕ и БОК, что приводит к самостоятельному перезапуску струйного аппарата СА2. В данной схеме наиболее ярко выражен процесс естественной циркуляции – перетекание питательной воды из промежуточной емкости в парогенератор (интервалы времени 9271-10068, 11205 -12416). Об этом свидетельствует наличие расхода питательной воды в отсутствие напора СА2.



характер. Причем инжектор выключается по достижении уровня емкости ПЕ 100%.

3.1. Запуск СПОТ

Большое внимание в экспериментах было уделено исследованию запуска струйного аппарата и,

соответственно, началу работы системы. На основании полученных экспериментальных данных построены графики запусков (рис. 4,5) и проанализированы величины, соответствующие процессам запуска СПОТ.

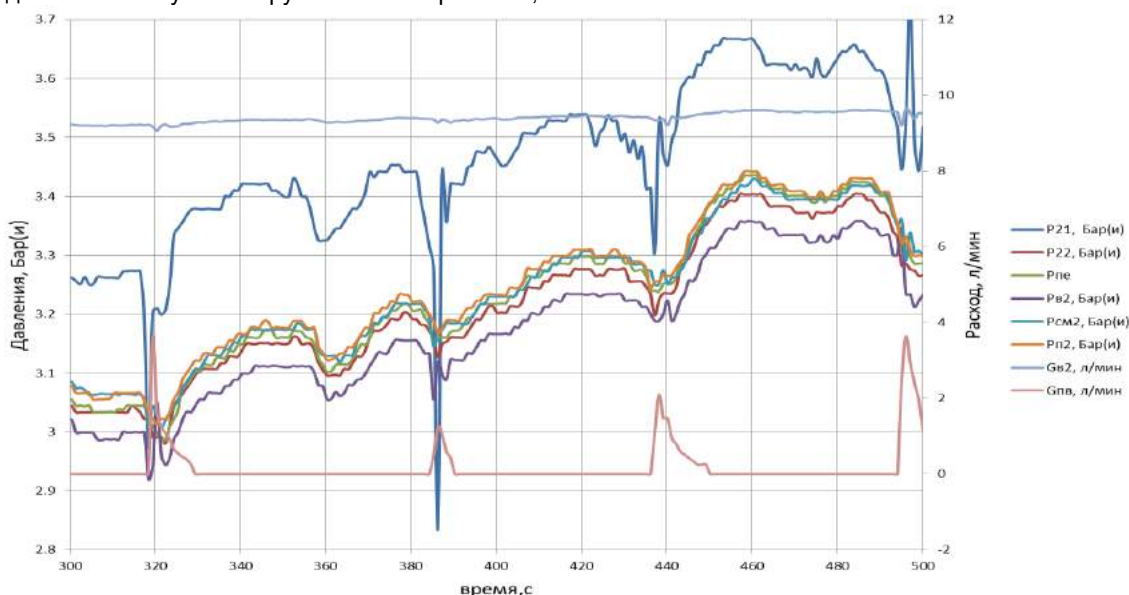


Рис. 6 – Характер процесса изменений давлений сред и процесс переброса питательной воды в ПГ

3.2. Работа ПВСА на постоянном расходе

При превышении подводимой мощности над отводимой, струйный аппарат в составе схемы «Макет 2» не выключается (рис. 7). Когда суммарное давление, созданное гидростатическим уровнем ПЕ и напором СА2, превышает давление на входе в ПГ,

происходит сброс питательной воды в ПГ. При этом наблюдается уменьшение уровня в ПЕ, уменьшение температуры Т6-5, за счет интенсивного ввода теплоносителя по тракту СА2 – Т6-5 – ПЕ, увеличение температуры Т6-4 – за счет переноса питательной воды из ПЕ в ПГ.

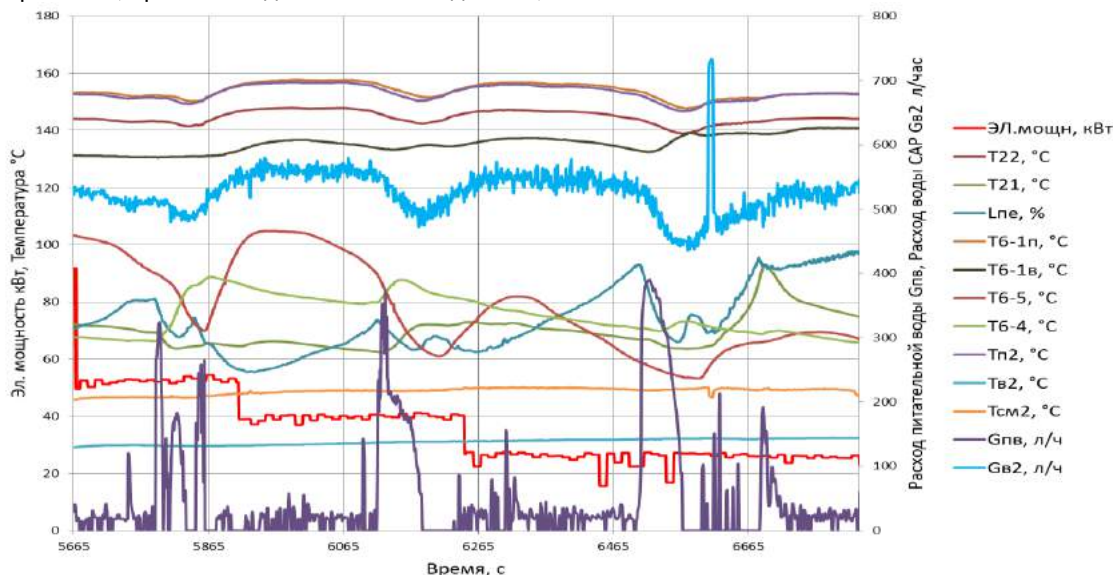


Рис. 7 – Характер изменения температур в контуре СПОТ при наличии постоянного расхода СА2

Характер изменения давлений в системе (рис. 8) также соответствует периодическим процессам сброса питательной воды в ПГ. С момента начала сброса питательной воды давления интенсивно снижаются, а затем также интенсивно возрастают. Из-за колебаний давлений изменяется недогрев, влияющий на производительность ПВСА, вследствие чего расход инжектора меняется синхронно с процессом переброса воды в ПГ.

Характер функционирования инжектора во временном интервале, соответствующем непрерывному расходу Gв2 приведен на рисунке 9.

Из представленного рисунка видно, что при работе инжектора за счет отвода тепла через ТО8-9 снижаются давления сред. Характер параметров давлений свойственный параметрам при работе ПВСА – давление смеси выше давления пара. В процессе работы коэффициент инжекции изменяется

незначительно, величина колеблется в пределах 32-38.

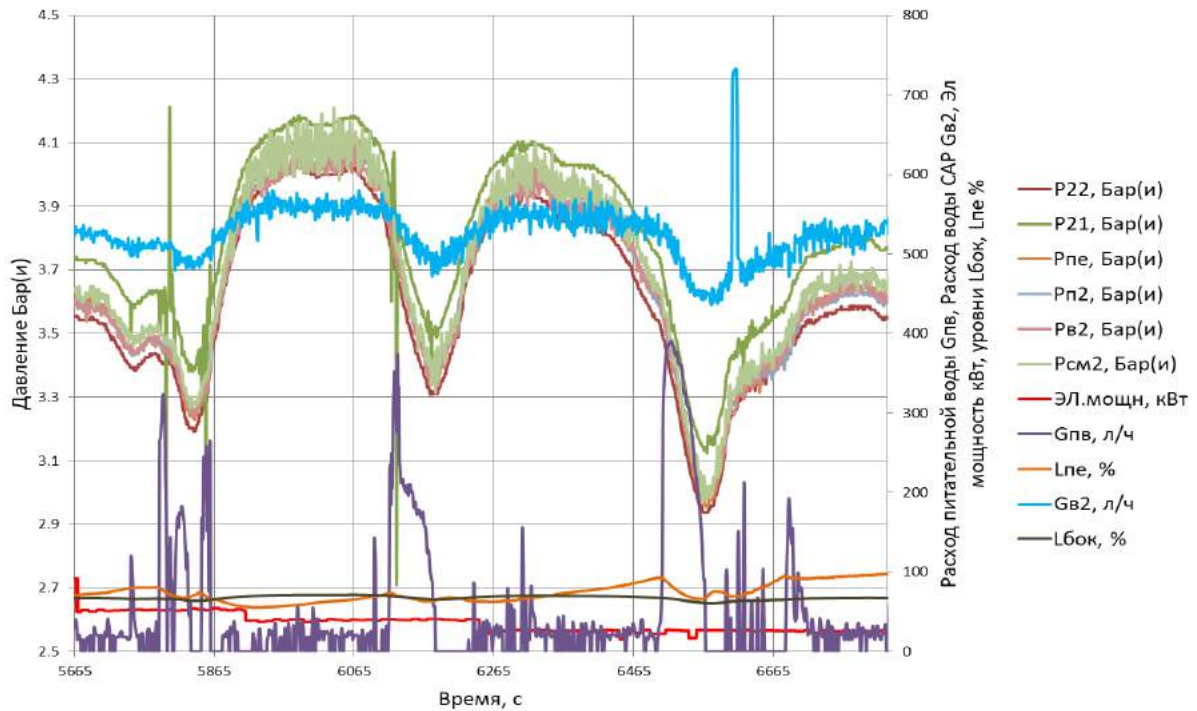


Рис. 8 – Характер изменения давлений в контуре СПОТ при наличии постоянного расхода СА2

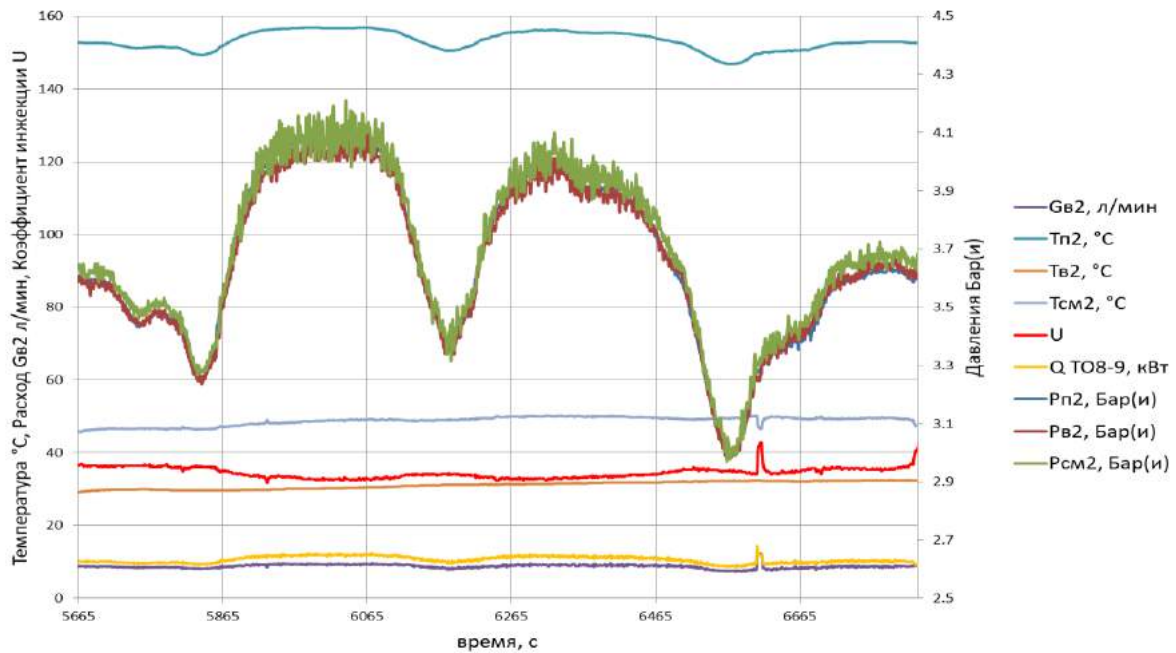


Рис. 9 – Характер функционирования инжектора и изменение параметров сред во временном интервале 5665-6828

### 3.3. Самостоятельный перезапуск ПВСА

При снижении подводимой электрической мощности, расхода воды возвращаемого СА2 в ПЕ хватает для обеспечения повышения в ней уровня. Данный процесс приводит к тому, что ликвидируется паровая подушка в ПЕ, обеспечивающая подачу пара на СА2. Принудительная циркуляция, инициируемая струйным аппаратом останавливается. При этом из

полной емкости ПЕ начинается интенсивный сброс воды в ПГ. Перенос воды из ПЕ в ПГ приводит к уменьшению уровня в ПЕ, при некотором уровне паровое сопло освобождается, но запуска инжектора не происходит, поскольку одновременно с падением уровня уходит вода и из приемной камеры СА2 – об этом свидетельствует рост температуры Тв2. Температура Т6-5 при этом снижается, что может



свидетельствовать о поступлении воды в ПЕ из БОК. Патрубок, соединяющий напорную ветку инжектора и БОК имеет диаметр прохода ДУ10, поэтому процесс переноса воды из БОК в ПЕ происходит медленно. Интенсивное увеличение температуры Т21 и дальнейший рост уровня ПЕ свидетельствует о вытеснении воды из ПГ обратно в ПЕ. Уровень ПЕ возрастает, затопливается приемная камера СА2, создавая условия для запуска ПВСА. Струйный аппарат запускается.

При минимальном уровне воды в емкости (см. рис.10) одновременно снижается уровень воды в

теплоотводящем контуре, и струйный аппарат заполняется паром. Об этом свидетельствует рост температуры Тсм2, находящейся ниже струйного аппарата. Этому моменту соответствует и практически нулевое значение разности давлений (Pпе-Рпе). Величина перепада давлений на участке паропровода от ПГ до ПЕ зависит от расхода пара из ПГ и качественно отражает его изменение. Поэтому максимальное заполнение ПГ водой из емкости приводит к паузе в расходе пара из ПГ.

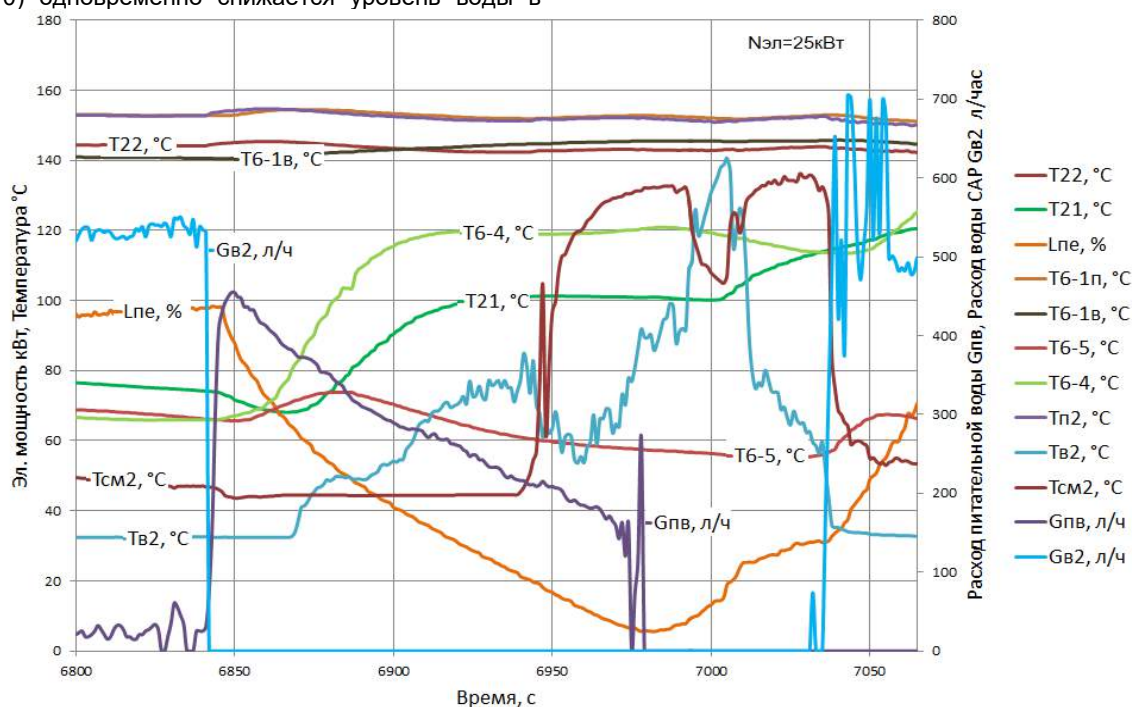


Рис. 10 – Характер изменения параметров температур и расходов в контуре СПОТ в процессе самостоятельного перезапуска СА2 (6800-7065)

После прекращения работы струйного аппарата (рис. 11) давления колебательно снижаются. Поскольку тепловыделение в системе не прекращается, то снижение давлений свидетельствует о том, система пришла в состояние, при котором выделяемое тепло полностью отводится в окружающую среду.

Приведенные на рисунке 12 данные показывают, что после уменьшения мощности до минимального значения, прекращается циркуляция по теплоотводящему контуру, но увеличивается расход воды по паропроизводящему контуру. Одновременно возрастает перепад давлений по паропроводу от ПГ до ПЕ. Очевидно, что по паропроизводящему контуру увеличивается расход естественной циркуляции.

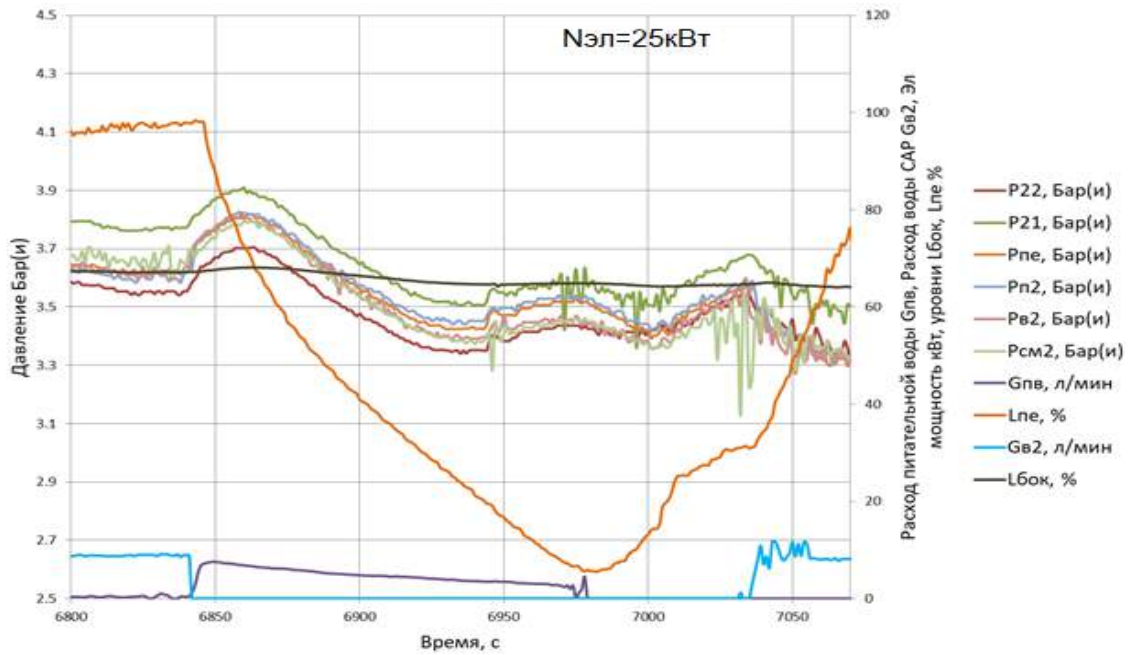


Рис. 11 – Характер изменения параметров давлений и расходов в контуре СПОТ в процессе самостоятельного перезапуска СА2 (6800-7065)

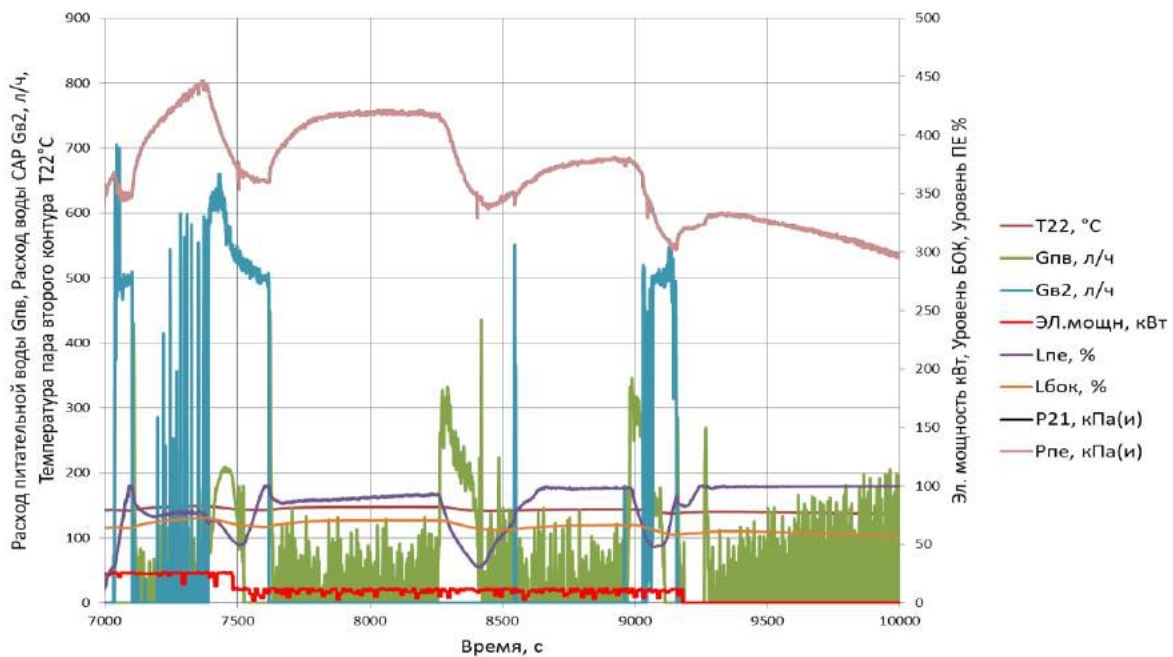


Рис. 12 – Процесс изменения расходов питательной и циркуляционной воды, температуры пара в ПГ и давлений в ПГ и ПЕ при снижении мощности до нуля

#### 4. Выводы

На основании полученных в результате испытаний данных можно сделать следующие выводы:

- 1) при подключении «Макет 2» к парогенератору СПОТ начинает самостоятельно функционировать (без вмешательства оператора);
- 2) данной схемой реализуется циклично-непрерывное функционирование контура отвода теплоты от парогенератора к расположенному на 2,5 м ниже теплообменному аппарату относительно ПГ и уровня места расположения оборудования СПОТ;
- 3) после останова принудительной циркуляции, обеспечиваемой струйным аппаратом, в контуре СПОТ создаются условия для повторного самостоятельного перезапуска СА;
- 4) возврат питательной воды в парогенератор происходит в циклическом режиме порциями, достаточными для парообразования, то есть без захлаживания последнего;
- 5) тепловой мощности, обеспечиваемой расходом струйного аппарата не достаточно для обеспечения расхолаживания системы с

номинальной мощности. Для увеличения отводимой теплоты необходимо изменить геометрические характеристики инжектора СПОТ и обеспечить реализацию параллельного подключения ПВСА.

#### Заключение

В ходе работы была выполнена экспериментальная проверка работоспособности рассмотренной схемы и выявлено, что схема нуждается в дальнейшей теоретической и экспериментальной проработке и может являться одним из вариантов построения СПОТ ЯППУ.

#### Литература

1. Шаманов Н.П., Кожемякин В.В., Алексеенко И.М., Шкляр Н.В. Ядерный моноблочный паропроизводящий агрегат с кипящей активной зоной, паровым компенсатором объема и струйными средствами циркуляции // Морской вестник, 2010, № 2 (34), с. 53-55.
2. Шаманов Н.П., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Соломянский В.Б., Алексеенко И.М. Полунатурный стенд для экспериментальных исследований судового ядерного моноблочного паропроизводящего агрегата «Бета» // Морской Вестник. – 2011. – № 2(38). – С. 47-48.
3. Шаманов Н.П., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Соломянский В.Б., Андреев А.Г., Экспериментальные исследования на полунатурном стенде судового ядерного моноблочного паропроизводящего агрегата «Бета-К» на приморской учебно-научной базе СПбГМТУ // Морской Вестник. – 2012. – № 2(42). – С. 29-31.
4. Большухин М.А., Пахомов А.Н., Соколов А.Н., Хизбуллин А.М. Система аварийного отвода тепла. Патент РФ на полезную модель № 150816 от 27.02.2015.

#### References

1. Shamanov N.P., Kozhemyakin V.V., Alekseenko I.M., Shklyarov N.V. Yadernyj monoblochnyj paroproizvodyashchij agregat s kipyashchej aktivnoj zonoj, parovym kompensatorom ob"ema i strujnymi sredstvami cirkulyacii Morskoj vestnik, 2010, № 2 (34), s. 53-55.
2. Shamanov N.P., Kozhemyakin V.V., Shamanov D.N., Solomyanskij V.B., Alekseenko I.M. Polunaturnyj stand dlya ehksperimental'nyh issledovanij sudovogo yadernogo monoblochnogo paroproizvodyashchego agregata «Beta». Morskoj Vestnik. 2011. № 2(38). pp. 47-48.
3. Shamanov N.P., Kozhemyakin V.V., SHamanov D.N., Solomyanskij V.B., Andreev A.G., EHksperimental'nye issledovaniya na polunaturnom stende sudovogo yadernogo monoblochnogo paroproizvodyashchego agregata «Beta-K» na primorskoj uchebno-nauchnoj baze SPbGMTU. Morskoj Vestnik. 2012. № 2(42). pp. 29-31.
4. Bol'shuhin M.A., Pahomov A.N., Sokolov A.N., Hizbullin A.M. Sistema avarijnogo otvoda tepla. Patent RF na poleznuyu model' № 150816 ot 27.02.2015.

УДК 681.518.54

## К ВОПРОСУ ОШИБКИ ПРОГНОЗА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ

**Олег Валентинович Хруцкий**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры судовой автоматики и измерений  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: obx47@mail.ru

**Александр Александрович Равин**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры судовой автоматики и измерений  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: ravinlki@mail.ru

**Валерий Викторович Медведев**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

### Аннотация

Можно уверенно констатировать, что цель прогнозирования технического состояния объектов морской техники заключается в предотвращении «внезапных» отказов и переводе их на упреждающую стратегию обслуживания с учетом результата прогноза. Между тем хорошо известно о том, что приемлемое решение такой прикладной задачи возможно при наличии информации об ожидаемой ошибке прогноза технического состояния объекта морской техники, что позволит спланировать наилучший вариант технического обслуживания. Известные способы оценки точности прогноза, например, абсолютная и относительная ошибки, не позволяют определиться, когда действительно наступит событие: с опережением прогноза или с запаздыванием? В статье авторами предлагается вариант оценки ошибки прогноза технического состояния объектов морской техники по контролируемому параметру с определением результата возможного свершения события. Приведен конкретный практический пример оценки ошибки прогноза.

**Ключевые слова:** объект морской техники, временной ряд, прогноз технического состояния, параметрический отказ, ошибка прогноза.

## ON THE ISSUE OF AN ERROR IN FORECAST OF TECHNICAL CONDITION OF MARINE FACILITIES

**Oleg V. Khrutsky**

Dr.Sci.Tech, professor  
Professor, Department of Ship Automation and Measurements  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: obx47@mail.ru

**Alexander A. Ravin**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor,  
Professor, Department of Ship Automation and Measurements  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: ravinlki@mail.ru

**Valery V. Medvedev**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor,  
Professor, Department of Marine Internal Combustion Engines and Diesel Plants  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

### Abstract

We can confidently state that the goal of forecasting the technical condition of marine facilities is to prevent "sudden" failures and transfer them to an anticipatory maintenance strategy, taking into account the result of the forecast. Meanwhile, it is well known that finding an acceptable solution to such an applied task is possible if there is information on the expected error in the forecast of the technical

condition of the marine facility, which will allow planning the best maintenance option. Known methods of assessing the accuracy of the forecast, for example, absolute and relative errors, do not allow to decide when the event really comes: ahead of the forecast or with a delay? In the article, authors propose an option for estimating the error of the forecast of the technical condition of marine facilities using a controlled parameter with determination of the result of a possible event occurrence. A specific practical example of forecast error estimation is given.

**Keywords:** marine facility, time series, technical condition forecast, parametric failure, forecast error.

### Введение

В сборнике научно-нормативных терминов «Прогностика» [1], ошибка прогноза трактуется как апостериорная величина отклонения прогноза от действительного состояния объекта или путей и сроков его осуществления. То есть получается, что о точности прогноза можно судить только после свершения некоторого события. Такое положение может быть и незначимо существенно, например, в сфере товаров потребления, но приобретает совершенно иное значение в процессе обеспечения безопасности эксплуатации объектов морской техники (ОМТ). Там же отмечается, что источником ошибки прогноза является фактор, обуславливающий появление ошибки. Применительно к ОМТ таким фактором является неточность математической модели временного ряда контролируемого параметра, применяемой для прогноза параметрического отказа объекта.

### 1. Метод прогноза технического состояния объектов морской техники

Рассматриваемый ниже метод, предназначен для реализации индивидуальных прогнозов ОМТ, где в качестве базы прогноза используется временной ряд (ВР) наблюдений за изменением контролируемого параметра (совокупности параметров) конкретного объекта. При этом, под ВР понимается последовательность измеренных значений контролируемого параметра (переменной  $y$ ) некоторого наблюдаемого физического процесса, происходящего в ОМТ, которые регистрируются через промежутки времени  $\Delta t$ , необязательно равные, и, пределе  $\Delta t \rightarrow 0$ , что соответствует записи на самописце. В скалярном представлении ВР есть множество  $\{y(t_j)\}_{j=1}^m$  значений переменной  $y$  из  $m$  чисел, соответствующих моментам времени  $t_j = t_H + j\Delta t$ , где  $t_H$  – начало наблюдения параметра  $y$ .

Временной ряд является предметом анализа при применении экстраполяционного метода прогнозирования, в котором выделяется две основные задачи.

Задача 1 – идентификация математической модели ВР, которая предполагает наличие ответа на вопрос о минимальном и достаточном числе параметров математической модели ВР и насколько адекватно эта модель представляет наблюдаемый процесс с физической точки зрения?

Задача 2 – прогноз ВР. Задача прогноза преследует цель установления на основе математической модели предсказания значений переменной на некотором временном интервале в будущем.

Следует заметить, что наличие математической модели ВР несколько ограничивает представления о реальном состоянии ОМТ, однако с этим приходится мириться.

Решение двух указанных задач базируется на предположении о том, что изменение контролируемого параметра во времени подчиняется некоторому детерминированному закону, который сохраняется неизменным как на интервале наблюдений за ОМТ (базовом прогнозном периоде), так и на интервале прогнозирования (будущем интервале времени).

Располагая аналитическим описанием этого закона, можно оценить ожидаемые изменения контролируемого параметра (параметрической характеристики технического состояния ОМТ) путём обычной экстраполяции, с учетом инерционности деградиционных процессов технического состояния. При этом предполагается, что неизбежные случайные флуктуации ВР можно довести до приемлемого уровня дисперсии путем применения операторов сглаживания, например, математического ожидания, текущего среднего, экспоненциального сглаживания и менее известных – интегральных [2].

В соответствии с изложенной концепцией, прогноз изменения состояния ОМТ предусматривает последовательное выполнение следующих этапов:

- выбор контролируемого параметра, имеющего наиболее сильную причинно-следственную связь с деградацией технического состояния ОМТ;
- накопление результатов измерений значений параметра на выбранном временном интервале (периоде основания прогноза), позволяющих сформировать ВР;
- аппроксимация ВР с целью выявления детерминированного закона изменения контролируемого параметра во времени (математической модели) и оценка статистических характеристик случайных отклонений, обусловленных флуктуациями процесса и погрешностями измерений;
- экстраполяция – применение установленного закона для определения прогнозируемого значения параметра при заданном приращении времени;
- оценка ожидаемой погрешности прогноза на основании статистических характеристик временного ряда.

В свою очередь аппроксимация ВР включает три последовательно выполняемых процедуры:

- выбор типа аппроксимирующей функции (математической модели) из числа конкурирующих;
- определение численных значений коэффициентов математической модели ВР, например, известным методом наименьших квадратов;
- оценка адекватности математической модели по отношению к исходному ВР и ее интерпретируемости

с физической точки зрения контролируемого процесса деградации технического состояния ОМТ.

При выборе аппроксимирующей зависимости известные компьютерные программы используют библиотеки типовых функций. Последовательно «перебирая» такие функции, вычисляя для них соответствующие числовые коэффициенты методом наименьших квадратов и оценивая погрешности аппроксимации, программа выбирает наиболее подходящую аппроксимирующую функцию.

Более рациональным, по мнению авторов, представляется применение алгоритмов, обеспечивающих поиск аппроксимирующих функций с помощью специальных операторов сглаживания неравномерности ВР и последующим переходом в фазовые плоскости с целью анализа результатов сглаживания и выбора наилучшей аппроксимирующей функции из числа конструируемых [3, 4].

Например, в [5] рассматривается такой алгоритм прогнозирования технического состояния узлов роторного корабельного энергетического оборудования по параметрам вибрации на примере опорного подшипника качения. Алгоритм, рассматриваемый в данной работе, позволяет определить математическую модель ВР и выполнить прогноз достижения уровня допустимого значения контролируемого параметра. В указанной статье отмечается, что ожидаемая (энтропийная) погрешность прогноза вибрации подшипника составляет  $\gamma \approx 12\%$ . Однако при этом не ясно, когда реально наступит событие: с опережением прогноза или с запаздыванием? Аналогичная неопределенность исхода наступления прогнозируемого события присутствует и в работах [6, 7].

**2. Ошибка прогноза технического состояния объектов морской техники**

Выясним возможность установления факта наступления контролируемого события при наличии ВР с объемом выборки  $\{y(t_j)\}_{j=1}^m$ . Поскольку заранее известно предельно допустимое значение контролируемого параметра  $Y_{\text{ПДЗ}}$ , то можно назначить и допустимое значение параметра  $Y_{\text{доп}} < Y_{\text{ПДЗ}}$ , например,  $Y_{\text{доп}} = 0,85 Y_{\text{ПДЗ}}$ , при достижении которого начинается процедура прогнозирования. На фазовой плоскости  $(y, \tilde{y})$ , определяющей положение пар точек  $(y_j, \tilde{y}_j)$ , где  $\tilde{y}_j$  – значения аппроксимирующей ВР функции, соответствующие моментам времени  $t_j = t_n + j\Delta t$ . Значения  $Y_{\text{ПДЗ}}$  и  $Y_{\text{доп}}$  определяют соответствующие области работоспособности ОМТ по контролируемому параметру и положение прямой в множестве точек фазовой плоскости при коэффициенте корреляции  $\rho_{y\tilde{y}} < |1|$ , что показано на иллюстрации к определению ошибки прогноза (рис. 1). Из иллюстрации следует, что область работоспособности ОМТ представляет собой квадрат, ограниченный предельно допустимым

значением контролируемого параметра по осям  $y, \tilde{y}$ . Данную область можно разделить на четыре квадранта (I-IV) относительно среднего значения  $Y_{\text{ср}}$  контролируемого параметра. Положение прямой в фазовой плоскости определяет коэффициент корреляции  $\rho_{y\tilde{y}}$ : при  $\rho_{y\tilde{y}} < (+1)$  любая прямая проходит через квадранты I и III, а при  $\rho_{y\tilde{y}} < (-1)$  через квадранты II и IV. На рис.1 показан вариант положения прямых АВ и CD, соответствующий положительному значению коэффициента корреляции (контролируемый параметр имеет тенденцию возрастания). Как видно, прогноз момента времени  $t_{\text{П1}}$  наступления события  $\tilde{y}(t) = Y_{\text{ПДЗ}}$  на основании аппроксимирующей функции  $\tilde{y}(t)$ , являющейся решением уравнения прямой CD, приведет к ошибке в сторону запаздывания. С другой стороны, прогноз с применением аппроксимирующей функции, найденной в результате решения уравнения прямой АВ фазовой плоскости приведет к ошибке в сторону опережения по отношению к времени действительного наступления события ( $t_{\text{П2}}$ ).

Таким образом, получается, что можно не только оценить энтропийную ошибку прогноза, но и указать какой ожидается результат свершения прогноза (с опережением или запаздыванием) по отношению к «идеальному» прогнозу, который возможен только при коэффициенте корреляции  $\rho = |1|$ , когда между значениями  $y(t_j)$  и  $\tilde{y}(t_j)$  существует функциональная (жесткая) связь.

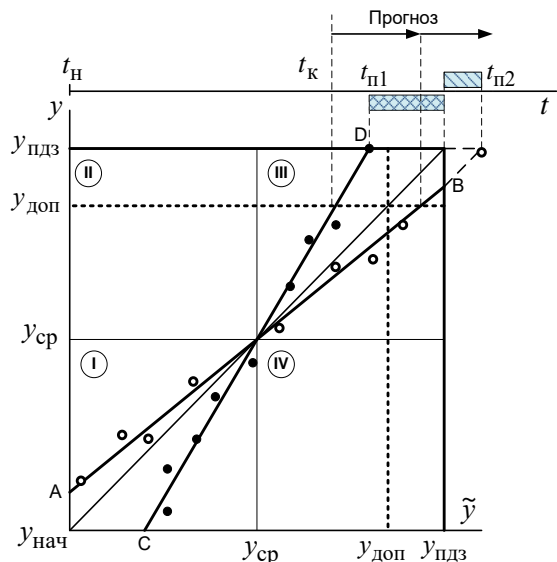


Рис. 1. Иллюстрация к определению ошибки прогноза

**3. Пример практического применения**

Основная цель утилизации теплоты уходящих газов от судовых энергетических установок заключается в повышении их эффективности,



экономии органического топлива и наращивания дополнительных энергетических мощностей. Например, в судовых энергетических установках утилизация теплоты позволяет достичь коэффициента использования химической энергии органического топлива до 45-47% и более, а коэффициент использования теплоты до 90%. При этом коэффициент использования теплоты во многом зависит от технического состояния утилизационного теплообменного аппарата и, в частности, от наличия отложений на трубах. Образование различных отложений в трубах теплообменного аппарата ведет к ухудшению теплопередачи и, следовательно, к уменьшению коэффициента полезного действия.

Рассмотрим пример, который базируется на данных, полученных, в свое время, профессором СПбГМТУ Проценко Г.В. при исследовании экспериментального судового утилизационного теплообменного аппарата в условиях нарастающего засоления трубок. Цель исследования заключалась в разработке способов повышения долговечности теплообменных аппаратов. Данные временного ряда были получены при измерении температуры рабочей среды (прямого диагностического параметра) на выходе секции теплообменного аппарата. Измерения проводились в течение 14 суток во время рейса судна и по общему времени составили 190 часов наблюдений (табл.1).

Проведем с данными результатов измерений таблицы следующий эксперимент. Примем, что предельно допустимое значение температуры на выходе секции теплообменного аппарата равно  $T_{доп} = 93,3^{\circ}\text{C}$ .

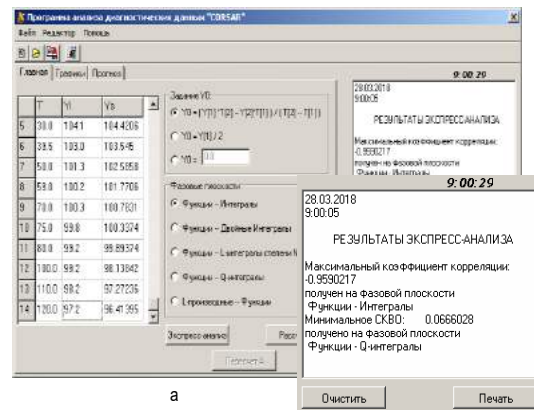
Таблица 1

Результаты измерений во время рейса

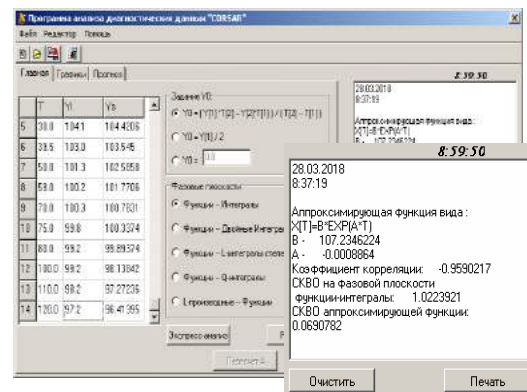
$t$ , час	4,0	8,5	13,0	19,0	30,0	39,5	50,0
$T$ , °C	107,4	108,4	105,3	106,3	104,1	103,0	101,3
$t$ , час	59,0	70,0	75,0	80,0	100,0	110,0	120,0
$T$ , °C	100,2	100,3	99,8	99,2	99,2	98,2	97,2
$t$ , час	130,0	140,0	150,0	160,0	170,0	180,0	190,0
$T$ , °C	98,2	96,0	96,3	95,4	93,3	94,2	93,3

Далее, для начала процедуры прогнозирования возьмем значение температуры  $y = T^0 = 97,2^{\circ}\text{C}$  что

соответствует выборке ВР объемом  $\{y(t_i)\}_{i=1}^{14}$  и обработаем его с помощью программы анализа диагностических данных. На рис.2,а представлена копия экрана (скриншот) результата экспресс-анализа фазовых плоскостей на предмет выявления фазовой плоскости с наибольшим коэффициентом корреляции  $\rho_{y\tilde{y}}$ .



а



б

Рис.2. Скриншоты экспресс-анализа временного ряда (а) и определения параметров аппроксимирующей функции (б)

Как видно, такой коэффициент корреляции получен на фазовой плоскости «функция–интеграл функции» и равен  $\rho_{y\tilde{y}} = -0,9590$ . При этом ожидаемая погрешность  $\gamma$ , характеризующая отклонение от линейной (функциональной) связи между  $y(t)$  и  $\tilde{y}(t)$  не превышает  $\gamma \approx 0,5\sqrt{1 - \rho_{y\tilde{y}}^2} = 0,14$ .

На рис.2,б приведен скриншот вычисления параметров аппроксимирующей ВР функции:  $\tilde{y}(t) = B \cdot \exp(-At) = 107,2 \cdot \exp(-0,0008t)$ .

Применим данную аппроксимирующую функцию для прогнозирования времени достижения теплоносителем на выходе секции предельно допустимой температуры:

$$t = [\ln B - \ln y_{\text{ПДЗ}}] / A \approx 173,8 \text{ час.}$$

Полученный результата прогноза проиллюстрирован на рис.3. Из рисунка следует, что по прогнозу с использованием аппроксимирующей ВР функции достижение предельно допустимого значения температуры на выходе секции теплообменного аппарата ожидается с возможным опережением на 16,2 часа, что не противоречит вышеопределенной энтропийной ошибке прогноза.



**Выводы**

На основании изложенного выше материала, можно сделать предварительный вывод, что предложенный вариант оценки ошибки прогноза технического состояния ОМТ подтверждает принципиальную возможность его применения в практике с целью предупреждения «внезапных» параметрических отказов. Кроме этого, применение алгоритма оценки ошибки прогноза технического состояния ОМТ позволит более эффективно организовать в целом информационную систему технической эксплуатации в судоходных компаниях [8].

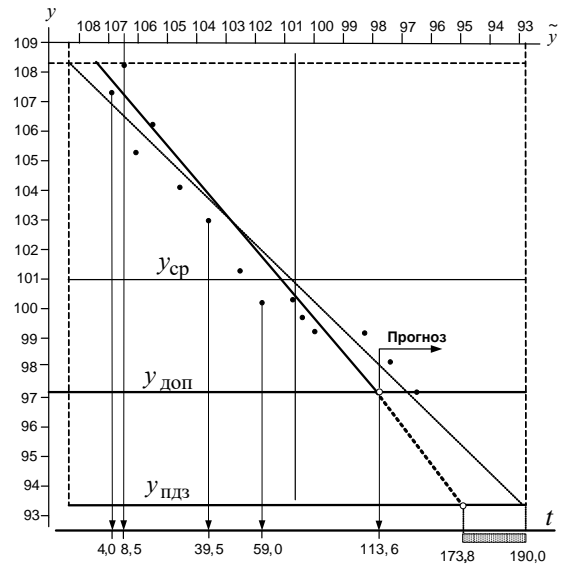


Рис.3. Фазовая плоскость погрешности прогноза

**Литература**

1. Прогностика. Терминология. (Сборник научно-нормативных терминов; Вып. 109). – М.: Наука, 1990. – 56 с.
2. Соболев Л.Г. Операционные методы в задачах идентификации экспериментальных функций тренда // Автоматика и телемеханика. – 1997, №2. – С.100-107.
3. Соболев Л.Г. Обработка результатов измерений в судостроении. – Л.: Изд-во ЛКИ, 1983. – 47 с.
4. Хруцкий О.В. Техническая диагностика. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2005. – 208 с.
5. Рогов С.С., Хруцкий О.В. Алгоритм прогнозирования технического состояния узлов роторного корабельного энергетического оборудования по параметрам вибрации // Морские интеллектуальные технологии. – 2016, №2(32) Т.1. – С.83-87.
6. Медведев В.В. Оценка риска эксплуатации ДВС при использовании деталей с трещинами // Турбины и дизели. – 2008, №2. – С.12-14.
7. Равин А.А. Прогнозирование состояния судового энергомеханического оборудования // Труды международной конференции по морским интеллектуальным технологиям МОРИНТЕХ-97, 1997. – С.150-153.
8. Никитин А.М. Управление технической эксплуатацией судов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 360 с.

**References**

1. Prognostika. Sbornik nauchno-normativnoi terminologii. M.: Nauka, 1990. 56 s. (In Russian)
2. Sobolev L.G. Operacionnye metody v zadachax identifikacii eksperimentalnix funkciy trenda. Avtomatika i telemexanika, 1997, №2, s. 100-107. (In Russian)
3. Sobolev L.G. Obrabotka rezultatov izmerenij v sudostroenii. L.: Izd-vo LKI, 1983. 47 s. (In Russian)
4. Khrutsky O.V. Texnicheskaya diagnostika. SPb.: Izd-vo SPBGMTU, 2005. 208 s. (In Russian)
5. Rogov S.S., Khrutsky O.V. Algoritm prognozirovaniya texnicheskogo sostoyaniya uzlov rotornogo korabelnogo oborudjvaniya po parametram vibracii. Morskie intellektual'ny'e tehnologiy, 2016, №2(32), T.1, S. 83-87. (In Russian)
6. Medvedev V. V. Ocenka riska e'kspluatacii DVS pri ispol'zovanii detalej s treshhinami. Turbiny' i dizeli, 2008, №2, S. 12-14. (In Russian)
7. Ravin A.A. Prognozirovanie sostoyaniya sudovogo e'nergomexanicheskogo oborudovaniya. Trudy' mezhdunarodnoj konferencii po morskim intellektual'ny'm tehnologiyam MORINTEX-97, 1997, S. 150-153. (In Russian)
8. Nikitin A.M. Upravlenie texnicheskoj e'kspluataciej sudov.- SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2006. 360 s. (In Russian)

УДК 629.12.05:594.647

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

**Александр Александрович Равин**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры судовой автоматики и измерений  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: ravinlki@mail.ru

**Валерий Викторович Медведев**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

**Олег Валентинович Хруцкий**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры судовой автоматики и измерений  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: obx47@mail.ru

### Аннотация

Основной целью прогнозирования изменений технического состояния и оценки остаточного ресурса оборудования является оптимизация его обслуживания за счёт обоснованного назначения сроков и объёмов профилактических ремонтов. Разумеется, достаточно успешное решение этой прикладной задачи возможно только при отсутствии значимых ошибок при формировании прогнозов в процессе эксплуатации оборудования. Традиционные способы оценки точности прогнозов с помощью таких показателей, как абсолютная и относительная ошибки при определении ожидаемых сроков наступления критических состояний оборудования абстрагированы от взаимосвязи корректности прогнозов с технико-экономической эффективностью эксплуатации технических объектов. В качестве показателя эффективности прогнозирования технического состояния авторами предложено использовать возможный экономический ущерб, вызванный удорожанием работ по восстановлению работоспособности оборудования в случае ошибочного прогнозирования его остаточного ресурса. В статье приведена методика вероятностной оценки величины этого ущерба и приведены примеры его расчёта для разных вариантов ошибочных прогнозов.

**Ключевые слова:** техническое оборудование, ошибки прогнозирования, стоимость профилактического и восстановительного ремонтов.

## EVALUATION OF FORECASTING EFFICIENCY OF EQUIPMENT TECHNICAL CONDITION

**Alexander A. Ravin**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor,  
Professor, Department of Ship Automation and Measurements  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: ravinlki@mail.ru

**Valery V. Medvedev**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor,  
Professor, Department of Marine Internal Combustion Engines and Diesel Plants  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

**Oleg V. Khrutsky**

Dr.Sci.Tech, professor  
Professor, Department of Ship Automation and Measurements  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: obx47@mail.ru

### Abstract

The main purpose of forecasting changes in the technical state and assessment of the residual life of equipment is to optimize its maintenance due to the reasonable scheduling and scope of preventive

repairs. Obviously, a fairly successful solution of this applied task is possible only in case of absence of significant errors in making forecasts during equipment operation. Conventional ways of assessing the accuracy of forecasts using indicators such as absolute and relative errors in determining the expected timing of critical equipment conditions are abstracted from the relationship between the accuracy of forecasts and the technical and economic efficiency of operation of engineering facilities. As an indicator of the efficiency of forecasting the technical condition, the authors proposed to use the potential economic damage caused by the increased cost of work to recover the equipment in case of an erroneous forecast of its residual life. The article presents a method of probabilistic estimation of the magnitude of this damage and gives examples of its calculation for different variants of erroneous forecasts.

**Keywords:** technical equipment, forecasting errors, cost of preventive repair and reconditioning.

**Введение**

Под эффективностью прогнозирования можно понимать многокомпонентную оценку, которая может рассматривать самые различные аспекты: универсальность, трудоёмкость и стоимость предварительных этапов, приспособленность к формированию краткосрочных и долгосрочных прогнозов, требования к объёму информационного обеспечения, необходимость разработки и применения специальной аппаратуры и т.п. [1]-[9]. К числу важнейших показателей, определяющих достоверность и эффективность прогнозов технического состояния оборудования, относится точность определения сроков проведения мероприятий по обслуживанию (осмотров, освидетельствований, тестовых испытаний, оперативных ремонтов).

В качестве характеристик точности прогнозов традиционно применяются оценки абсолютной ( $\Delta$ ) и относительной ( $\delta$ ) погрешностей:

$$\begin{aligned} \Delta &= T_n - T_\phi \text{ (часов);} \\ \delta &= (\Delta / T_\phi) \cdot 100 \text{ (\%),} \end{aligned} \tag{1}$$

где  $T_n$  и  $T_\phi$  – прогнозируемый и фактический интервалы времени до наступления ожидаемого события (например, до поломки механизма).

Абсолютная погрешность характеризует как величину отклонения, так и его направление («+» или «-»), однако она мало пригодна для сравнительной оценки точности прогнозирования процессов с различной скоростью протекания. Относительная погрешность в этом смысле является более универсальной, однако она не приспособлена к объективной оценке качества прогнозирования с учётом возможных последствий ошибочных прогнозов.

В качестве меры таких последствий целесообразно, по мнению авторов, рассматривать размеры возможных экономических рисков, обусловленных ошибочным назначением сроков проведения профилактических мероприятий, направленных на предотвращение поломок и отказов оборудования.

**1. Методика оценки экономических последствий ошибок прогнозирования**

Эксплуатационные повреждения оборудования в общем случае являются результатом совместного действия большого числа различных факторов, что даёт основания полагать, что разброс возможных сроков возникновения неисправности механизма соответствует нормальному закону распределения. При этом с вероятностью  $P = 0,9973$  можно утверждать, что все неисправности возникнут во временном диапазоне от  $M - 3\sigma$  до  $M + 3\sigma$ , где  $M$  – математическое ожидание долговечности механизма, а  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение.

Соответственно, для времени эксплуатации  $t \leq M - 3\sigma$  вероятность возникновения неисправности  $P_n = 0$ , для времени эксплуатации  $t \geq M + 3\sigma$  вероятность  $P_n = 1$ . Внутри временного интервала  $M - 3\sigma < t < M + 3\sigma$  вероятность возникновения неисправности будет определяться выражением:

$$P_n = \int_{M-3\sigma}^{M+3\sigma} f(t) dt, \tag{2}$$

$$\text{где } f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-M)^2}{2\sigma^2}}.$$

Вероятность исправного состояния в тех же временных интервалах будет определяться выражением:

$$P_n = 1 - P_n. \tag{3}$$

Графическая иллюстрация этого алгоритма представлена на рис.1.

Из сказанного следует, что необходимым и достаточным условием упреждения внезапного отказа объекта будет формирование прогноза его долговечности, в соответствии с которым профилактику следует провести при  $t = T_A = M - 3\sigma$ . В этом случае затраты будут определяться суммой стоимости упреждающего ремонта исправного оборудования  $C_n$  (отрезок  $A_1-A_2$  на графике) и дополнительных затрат (отрезок  $A_2-A_3$  на графике), связанных с обслуживанием банковского кредита (если средства на ремонт взяты в кредит) или недополученной прибылью (если средства на оплату ремонта сняты с депозита). Крутизна отрезка  $A_2-A_3$  определяется размером банковской процентной ставки.

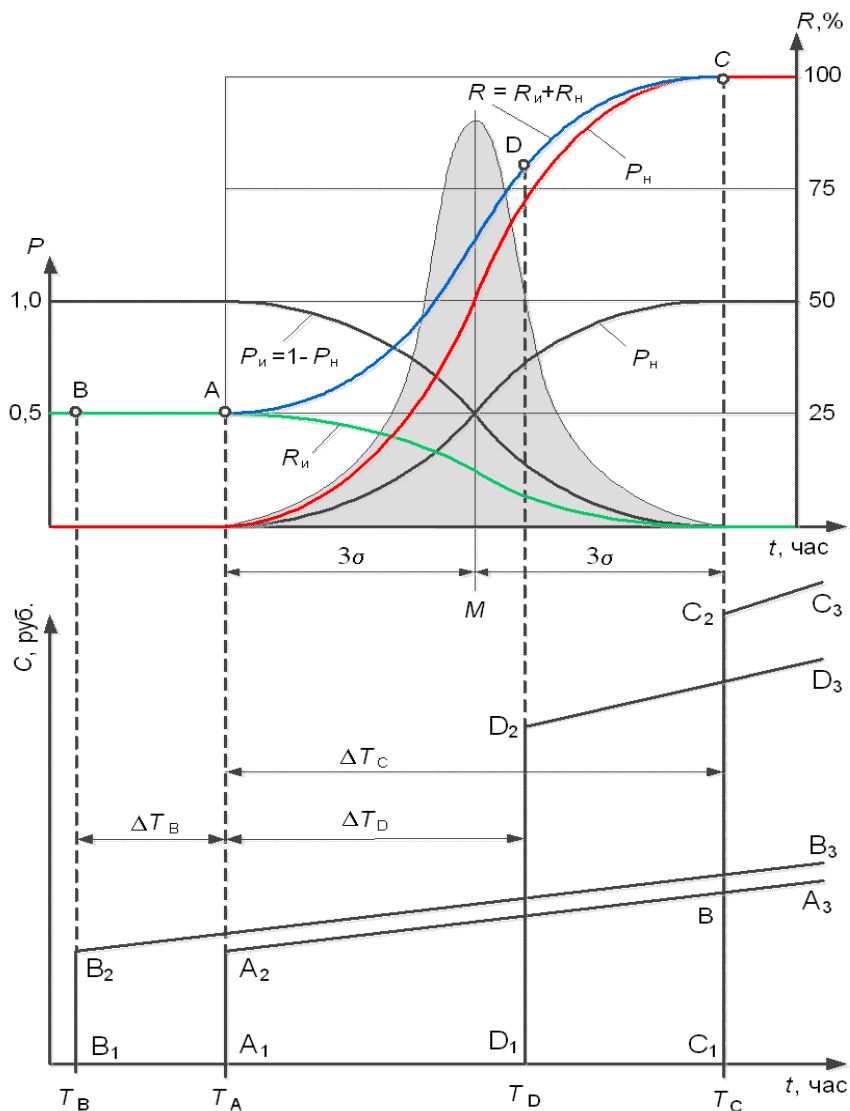


Рис. 1. Анализ последствий ошибочных прогнозов

Если в результате чрезмерно pessimистичного прогноза время упреждающего ремонта будет назначено на  $t = T_B$ , т.е. на величину  $\Delta T_B$  раньше рассмотренного выше оптимального срока, затраты на его проведения будут соответствовать траектории  $B_1-B_2-B_3$  на графике.

Величина отрезка  $B_1-B_2$  будет такой же, как и отрезка  $A_1-A_2$ , т.е. соответствовать стоимости самого ремонта исправного оборудования  $C_{и}$ , а график  $B_2-B_3$  пройдёт выше графика  $A_2-A_3$  в связи с более ранним началом выплат банковских услуг.

В другом крайнем случае, когда в результате необоснованно оптимистичного прогноза ремонт запланирован на момент  $t = T_C = M + 3\sigma$  (или ещё позже), он станет уже не упреждающим, а послеаварийным. При этом его стоимость  $C_H$  (отрезок  $C_1-C_2$  на рис.1) будет существенно выше, чем стоимость упреждающего ремонта исправного оборудования  $C_{и}$ .

Если в результате ошибки прогнозирования  $\Delta T_D$  запланированный момент проведения ремонта приходится на временной интервал  $M - 3\sigma < t < M + 3\sigma$ , могут иметь место два варианта: либо оборудование ещё находится в исправном

состоянии (с вероятностью  $P_{и}$ ), либо уже произошла поломка и отказ (с вероятностью  $P_H$ ).

В этом случае вероятную стоимость ремонта (график синего цвета на рис.1) можно оценить, как сумму рисков, связанных с возможностью упреждающего ремонта исправного оборудования и восстановительного ремонта неисправного оборудования:

$$R = R_{и} + R_H, \tag{4}$$

где  $R_{и} = C_{и} \cdot P_{и}$  и  $R_H = C_H \cdot P_H$ .

При этом ожидаемая стоимость ремонта будет занимать промежуточное положение между вариантами A и C.

**2. Пример применения предлагаемой методики**

Пусть для некоторого оборудования X характерны следующие показатели:

- математическое ожидание ресурса  $M = 40$  тыс. часов;
- коэффициент вариации ресурса  $K_{ВАР} = 0,05$ ;
- стоимость упреждающего ремонта  $C_{и} = 25$  тыс. руб.;
- стоимость восстановительного ремонта  $C_H = 100$  тыс. руб.;

- банковская ставка  $Z = 1,5\%$  на тысячу часов.  
 Результаты расчётов затрат, приведённых к моменту времени  $t = T_c = M + 3\sigma$ , для рассмотренных выше вариантов приведены в табл.1.

долговечности оборудования на стоимость поддержания его работоспособности и подтверждают возможность применения предложенной методики для экономической оценки достоверности прогнозирования.

**Выводы**

Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии ошибочной оценки

**Экономическая оценка возможных погрешностей прогнозирования долговечности оборудования**

Наименование параметров	Значения параметров для разных вариантов прогноза			
	Вариант А	Вариант В	Вариант С	Вариант D
Среднеквадратичное отклонение, час.	$\sigma = M \cdot K_{\text{БАР}} = 2000$ час.			
Назначенный срок ремонта, час.	34000	30000	46000	41200
Абсолютная ошибка прогноза, час.	-	-4000	+12000	+7200
Относительная ошибка прогноза, %	-	-10	+30	+18
Стоимость ремонта, руб.	25000	25000	100000	80000
Дополнительные затраты, руб.	4500	6000	0	3600
Полная стоимость ремонта, руб.	29500	31000	100000	83600
Стоимость ошибки прогноза, руб.	-	1500	68500	54100

**Литература**

1. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
2. Кромин Ю.В. Метод расчета израсходованного и остаточного индивидуального ресурсов дизелей в зависимости от особенностей эксплуатации на конкретном объекте // Двигателестроение. – 1996, №3-4. – С. 48-53.
3. Равин А.А., Хруцкий О.В. Прогнозирование технического состояния оборудования: монография. – Germany, Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2014. – 141 с.
4. Медведев В.В. Применение имитационного моделирования для обеспечения надежности и безопасности судовых энергетических установок: монография. – СПб.: Страта, 2013. – 352 с.
5. Хруцкий О.В. Прогнозирование технического состояния функционально-самостоятельных элементов судовой энергетической установки: дис....докт. техн. наук: 05.08.05 / Хруцкий Олег Валентинович – СПб., 1996. – 263 с.
6. Погуляева М.А. Разработка алгоритма управления работоспособностью элементов судовой энергетической установки на интервале прогнозирования: дис....канд. техн. наук: 05.08.05 / Погуляева Марина Александровна – СПб, 2011. – 129 с.
7. Медведев В.В., Половинкин В.Н. Оценка экономической эффективности мероприятий по обеспечению надежности и безопасности СЭУ // Судостроение. – 2010, №4. – С.57-59.
8. Хруцкий О.В., Алексеев А.В., Равин А.А., Рогов С.Н., Рогов С.С., Согонов А.С. Прогнозирование технического состояния объектов морской энерготехники, как одна из задач проблемы безопасности её эксплуатации // Сб. материалов Международной конференции по судостроению и океанотехнике NAOE-2016. – С. 327-331.
9. Никитин А.М. Анализ экономической эффективности мероприятий по снижению рисков отказов судовых двигателей внутреннего сгорания // Двигателестроение. – 2007, №2. – С.33-36.

**References**

1. Bolotin V.V. Prognozirovaniye resursa mashin i konstruksiy. M.: Mashinostroyeniye. 1984. 312 s. (In Russian)
2. Kromin Yu.V. Metod rascheta izraskhodovannogo i ostatechnogo individualnogo resursov dizeley v zavisimosti ot osobennostey ekspluatatsii na konkretnom obyekte. Dvigatelistroyeniye. 1996. №3-4. S. 48-53. (In Russian)
3. Ravin A.A., Khrutskiy O.V. Prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya: monografiya. Germany, Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2014. 141 s. (In Russian)
4. Medvedev V.V. Primeneniye imitatsionnogo modelirovaniya dlya obespecheniya nadezhnosti i bez-opasnosti sudovykh energeticheskikh ustanovok: monografiya. – SPb.: Strata. 2013. – 352 s. (In Russian)
5. Khrutskiy O.V. Prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya funktsionalno-samostoyatelnykh elemen-tov sudovoy energeticheskoy ustanovki: dis....dokt. tekhn. nauk: 05.08.05 / Khrutskiy Oleg Valentinovich. SPb. 1996. 263 s. (In Russian)
6. Pogulyayeva M.A. Razrabotka algoritma upravleniya rabotosposobnostyu elementov sudovoy energe-ticheskoy ustanovki na intervale prognozirovaniya: dis....kand. tekhn. nauk: 05.08.05 / Pogulyayeva Marina Aleksandrovna. SPb. 2011. 129 s. (In Russian)
7. Medvedev V.V., Polovinkin V.N. Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti meropriyatiy po obespeche-niyu nadezhnosti i bezopasnosti SEU. Sudostroyeniye. 2010. №4. S.57-59. (In Russian)
8. Khrutskiy O.V., Alekseyev A.V., Ravin A.A., Rogov S.N., Rogov S.S., Sogonov A.S. Prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya obyektov morskoy energotekhniki. kak odna iz zadach problemy bezopasnosti eye ekspluatatsii. Sb. materialov Mezhdunarodnoy konferentsii po sudostroyeniyu i okeanotekhnike NAOE-2016. S. 327-331. (In Russian)
9. Nikitin A.M. Analiz ekonomicheskoy effektivnosti meropriyatiy po snizheniyu riskov otkazov sudovykh dvigateley vnutrennego sgoraniya. Dvigatelistroyeniye. 2007. №2. S.33-36. (In Russian)

УДК 629.5.03: 632.151

## КРАТКИЙ ОБЗОР И АНАЛИЗ ПРИМЕРОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Валерий Викторович Медведев**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

**Олег Валентинович Хруцкий**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры судовой автоматики и измерений  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: obx47@mail.ru

**Александр Александрович Равин**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры судовой автоматики и измерений  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: ravinlki@mail.ru

### Аннотация

Широкие возможности имитационного моделирования (ИМ) технических систем, к которым безусловно относятся судовые энергетические установки, в первую очередь определяются универсальным характером данного метода исследования. Метод ИМ позволяет решать задачи высокой сложности, обеспечивает имитацию сложных и многообразных процессов, с большим количеством элементов. Отдельные функциональные зависимости в таких моделях могут описываться громоздкими математическими соотношениями. Поэтому ИМ эффективно используется в задачах исследования систем со сложной структурой с целью решения конкретных проблем. В работе представлен краткий анализ и обзор работ, в которых имитационное моделирование использовалось при решении ряда актуальных задач в области проектирования и эксплуатации судовых энергетических установок. Рассмотрены типичные приемы и особенности реализации ИМ, учитывающие специфику исследованных объектов. Описаны достоинства и недостатки различных способов реализации ИМ.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, обзор, анализ, судовые энергетические установки.

## BRIEF REVIEW AND ANALYSIS OF SIMULATION MODELING EXAMPLES OF SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS

**Valery V. Medvedev**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor,  
Professor, Department of Marine Internal Combustion Engines and Diesel Plants  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

**Oleg V. Khrutsky**

Dr.Sci.Tech, professor  
Professor, Department of Ship Automation and Measurements  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: obx47@mail.ru

**Alexander A. Ravin**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor,  
Professor, Department of Ship Automation and Measurements  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: ravinlki@mail.ru

### Abstract

The wide possibilities of simulation modeling (SM) of technical systems, to which ship power plants certainly belong, are primarily determined by the universal nature of this research method. The SM method allows solving problems of high complexity, provides a simulation of complex and diverse

processes, with a large number of elements. Separate functional dependencies in such models can be described by lengthy mathematics. Therefore, SM is effectively used in problems of researching systems with a complex structure in order to solve specific problems. The paper presents a brief analysis and review of works in which simulation modeling was used in solving a number of urgent problems in the design and operation of ship power plants. The typical techniques and features of SM implementation, taking into account the specifics of the prototype systems, are reviewed. The advantages and disadvantages of various methods of implementing SM are described.

**Keywords:** simulation modeling, review, analysis, ship power plants.

### Введение

Имитационное моделирование (ИМ) в настоящее время находит широкое применение в различных научных исследованиях. Этому способствует как хорошо разработанная теоретическая база, изложенная, например, в работах [1]-[3], так и наличие большого спектра программного обеспечения имитации в виде мощных продуктов ИМ, таких как Arena, AutoMod, AnyLogic, Extend, GPSS World и других.

Кроме того, в Российской Федерации активно действует Национальное общество имитационного моделирования, которое в 2015 году принято в постоянные члены Европейской ассоциации обществ имитационного моделирования EUROSIM. Очень полезны регулярно проводимые (с 2003 года) всероссийские научно-практические конференции по ИМ и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД) и (с 2011 г.) международные научно-практические конференции «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС), а также другие конференции, касающиеся проблем этой области.

ИМ применяется при изучении и совершенствовании судостроительных производств (пример последних работ [4]-[6]), а также портовых операций ([7] и обзор в [8]), движения судов, в частности, при торможении судна с дизельным двигателем [9], при обучении нейросетевых моделей [10], а также при определении состава флота [11], проектировании судов и объектов морской техники (например, в работах [12]-[14]), анализе аварийных ситуаций на судах [15]-[17], формировании экипажа судна [18] и т.д.

Между тем, судовая энергетическая установка (СЭУ) в целом, а также ее отдельные элементы (главные и вспомогательные), являются специфическими объектом, для которого возможность использования процедуры ИМ требует более подробного обоснования.

### 1. Примеры имитационного моделирования судовых энергетических установок

Одним из важных направлений применения ИМ является **обеспечение надежности СЭУ и снижение рисков ее эксплуатации**. В монографии [19] рассмотрены вопросы, связанные с применением имитационного моделирования для обеспечения надежности и безопасности судовых энергетических установок на разных этапах их проектирования, модернизации и в процессе эксплуатации. Особое внимание уделено разработке оригинальных методик и алгоритмов, обеспечивающих подготовку и реализацию имитационного моделирования. Приведены характерные примеры и результаты моделирования

ресурсных показателей судовых дизелей, теплового состояния элементов СЭУ, уровней вибрации и шума, экономической эффективности. В монографии представлены достаточно универсальные программные продукты на основе языков программирования типа Borland Delphi, пригодные для реализации процедуры ИМ. В программах статистические испытания проводятся хорошо зарекомендовавшим себя методом Монте-Карло.

В работе [20] приведены оценки структурных рисков СЭУ, базирующиеся на применении когнитивно-имитационного моделирования.

Предложенная в [21] имитационная модель, основанная на комбинации логико-вероятностного и логико-лингвистического моделирования позволяет прогнозировать аварийные ситуации в стационарных энергетических установках большой единичной мощности может быть применима и к СЭУ.

В работе [22] разработана модель, позволяющая оценивать возможность дальнейшей эксплуатации СЭУ, имеющих наработку с определением остаточного ресурса механизмов и возможностью выбора наиболее эффективных и экономичных путей для его повышения в процессе ремонта и модернизации с использованием метода формализованной оценки безопасности. Автор создал программы, реализующие имитационные алгоритмы Монте-Карло.

Результаты разработки метода оценки и прогнозирования технического состояния функционально-взаимосвязанных судовых сложных технических систем (СТС), включающих и СЭУ, при экстремальных условиях представлены в работе [23]. Для решения поставленной задачи разработаны когнитивные имитационные модели оценки и прогнозирования технического состояния СТС, которые применяются для информационного обеспечения поддержки принятия решений при поиске причин отказов элементов судовых СТС.

В работе [24] рассматривается возможность использования ИМ при анализе рисков материальных потерь для грузо- и судовладельцев при выполнении технического обслуживания и ремонта СЭУ.

Результаты перечисленных выше работ могут применяться как для главных, так и вспомогательных СЭУ.

В [25]-[27] ИМ использовано **для обоснования нагрузки судовой электростанции**, что позволит дать ощутимый результат при проектировании судов и установок, не имеющих аналогов, с большим числом мощных электропотребителей. В этих работах моделирование случайных независимых величин нагрузок судовых потребителей также предложено проводить методом статистических испытаний (Монте-Карло). Авторы использовали собственные программы, написанные на языках программирования высокого уровня.



Поскольку в судостроении существует интерес к проектированию **судов с комбинированными энергетическими установками и судов с электродвижением**, то стоит обратить внимание на работу [28]. В работе рассмотрено применение имитационных моделей электростанции – для исследования возможности совместной работы двух разных типов генераторов электрического тока – дизельного и газотурбинного, а также отработки навыков по безаварийному их управлению.

В работе [29] приведены результаты разработки имитационной модели сложной энергетической системы плавающей буровой установки. Система включает в себя локальные и высшего уровня системы управления, позволяющие проводить оценку энергетических затрат на управление позиционированием. Автономная судовая энергетическая система содержит, в частности, подсистему «автономные генераторы – источники энергии».

Можно констатировать, что ИМ является весьма привлекательным инструментом при исследовании моделей **динамически позиционирующего оффшорного судна**. Так, например, в работе [30] приведены результаты моделирования проведенного с помощью среды MatLab/Simulink в специально разработанном программном комплексе Ships\_CPC. Программный комплекс представляет собой совокупность функциональных блоков компонентов СЭУ **дизель-электрических комбинированных пропульсивных комплексов**, построенных по классическому принципу «вход-выход». Развитие этого направления исследований представлено в работе [31], содержащей обширную библиографию.

## 2. Примеры имитационного моделирования элементов судовых энергетических установок

**Теплообменные аппараты** (ТА) являются важной составной частью судовой энергетической установки. Они применяются как в общесудовых системах, так и в системах, обслуживающих главные и вспомогательные дизели. В работе [32] предложена математическая модель, позволяющая выполнить проектный или поверочный расчет теплообменных аппаратов различного назначения, а также имитировать их работу на различных режимах. Метод ИМ был применен в работе [33] для моделирования загрязнения теплопередающих поверхностей теплообменного аппарата. Однако использованный там алгоритм не учитывает стохастический характер роста отложений. В работе [34] основной упор сделан на учет этого фактора.

В [35] приведены описание имитационной модели и результаты применения методов управления процессом обеспечения безопасности при эксплуатации **термомасляных котлов**. Основой имитационного моделирования является логико-лингвистическая модель.

Достаточно успешно ИМ используется для определения нагрузок, действующих на **судовой валопровод**. Работа [36] положила начало этому направлению исследований, развитие изложено в работе [37], а определенный итог подведен в [38]. Основной идеей этих работ является попытка учета слияния случайных динамических воздействий на судовой валопровод со стороны внешней среды, в

качестве которой выступает ледовая обстановка в районе эксплуатации судна. Для проведения статистических испытаний методом Монте-Карло использовались программы, написанные на языках программирования Fortran и Pascal.

В [39] рассматривается имитационная модель **гребной электрической установки**, обеспечивающая адекватное воспроизведение процессов маневрирования ГЭУ, которая может быть использована при разработке системы автоматического управления первичным двигателем и частотой вращения гребного вала, а также для предварительной оценки маневренных характеристик судна. Источником электрической энергии является турбогенератор.

Еще одним примером может служить работа [40], в которой для оценки и сравнения экономической эффективности различных вариантов выполнения оригинального движительного комплекса судна использовались результаты, полученные с помощью разработанных в среде MatLab/Simulink имитационных моделей: ротора Флеттнера; ГЭУ на переменном токе с использованием преобразователей с широтно-импульсной модуляцией и систем активного движения; двойного рода тока с использованием индуктивно-ёмкостного преобразователя и систем активного движения. Особенностью этого примера ИМ является попытка учета стохастического характера ветров в районе предполагаемой эксплуатации судна.

Неотъемлемой частью большинства систем СЭУ являются трубопроводы по которым происходит движение рабочих сред. В работе [41] описаны особенности моделирования трубопроводов с помощью современных программных комплексов и особенности выбора расчетных моделей для данного класса задач. Из представленных в работе сведений есть и такие, которые подходят для исследования **судовых трубопроводов**.

Особую значимость рассматриваемый метод приобретает в качестве инструмента исследования стохастических объектов, например, судовых систем с элементами, которые случайным образом изменяют во времени своё состояние. В качестве примера можно указать на приведённые в [42] оценки технико-экономических последствий отказов автоматизированной гидравлической системы, полученным методом ИМ.

Самым распространённым на судах источником энергии являются **двигатели внутреннего сгорания** (ДВС). Среди них **дизели** занимают подавляющее место. Естественно, что ИМ достаточно широко используется при исследовании различных аспектов жизненного цикла этих сложных изделий. Помимо упомянутых выше работ [19], [22] и [24], в которых собственно ДВС уделено достаточно внимания, существует большое число исследований, касающихся этой тематики. Поэтому данное направление ИМ достойно отдельного подробного рассмотрения.

Для судовых турбин известны практически единичные работы, гораздо больше внимания ИМ уделено для наземных и авиационных **газотурбинных двигателей** (ГТД). Для последних двигателей отмечена тенденция к конвертации в судовые, что выполняет, например, НПО «Сатурн-ВМФ». Поэтому сведения, касающиеся специфики

ИМ ГТД, можно найти в литературе для данного вида объектов.

В настоящей работе целенаправленно не рассматривается применение ИМ для исследования *судовых ядерных энергетических установок*.

#### Заключение

Проведенный анализ выявленных работ показал, что есть мощные программные средства для осуществления ИМ, но они облегчают только сам процесс испытаний и не касаются самой трудоемкой задачи сбора исходной информации, ее интерпретации, формализации и адекватного соотношения с конкретным объектом. При этом освоение таких программных сред требует

значительных усилий (о чем косвенно можно судить по обилию учебной литературы, обучающих семинаров и т.п.), а использоваться они будут весьма ограничено. Остаются также вопросы, связанные с доступностью этих программных продуктов и возможностью их освоения достаточно широким кругом специалистов. В этих условиях авторам многих исследований потребовалось создать достаточно универсальные программные продукты на основе языков программирования высокого уровня, пригодных для реализации процедуры ИМ и использования в процессе исследования СЭУ и ее элементов.

#### Литература

1. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1968. – 355 с.
2. Шеннон Р.Дж. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
3. Кобелев Н.Б. Введение в общую теорию имитационного моделирования. Пособие для разработчиков имитационных моделей и их пользователей. – М.: ООО «Принт-Сервис», 2007. – 126 с.
4. Дорофеев В.И., Кляхин В.Н., Фомичев А.Б. Методы обоснования направлений модернизации судосборочного цеха судостроительного предприятия на базе имитационного моделирования // Морской вестник. – 2017, № 2(62). – С.40-43.
5. Долматов М.А., Плотноков А.М., Федотов М.В., Девятков Т.В. К вопросу об имитационном моделировании судостроительных производств – универсальный подход к построению моделей и проведению экспериментов // В сборнике: Имитационное моделирование. Теория и практика восьмая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. 2017. – С.366-367.
6. Изотов О.А., Гулятьев А.В. Оценка требуемых технологических ресурсов путем статистического моделирования // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2018, Т.10, № 3. – С.497-506.
7. Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Ткаченко А.С., Попов Г.Б. Имитационное моделирование как инструмент расчета наземных контейнерных терминалов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2018, №1. – С.100-108.
8. Янченко А.А. Научные подходы к исследованию процессов функционирования морских портов и портовых терминалов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2018, №55. – С.185-192.
9. Равин А.А., Амирли Э.А. Моделирование режимов экстренного торможения судна // Судостроение. – 2017, №5(834). – С.12-15.
10. Овчаренко И.М. Интеллектуальная полезная модель автоматического управления судном с нейросетевой обработкой информации в концепции беспилотного судна Е-навигации // Транспортное дело России. – 2018, №2. – С.97-103.
11. Гайкович А.И., Лукин С.И. Постановка задачи оптимизации плавучего тыла военно-морского флота России // Морские интеллектуальные технологии. – 2015, Т.1, №1(27). – С.15-21.
12. Дикшев И.В., Пьянков И.Б. Программный информационный комплекс "Виртуальный технически сложный объект морской техники" // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015, № 6-2. – С.52-61.
13. Бойко М.С. Имитационное моделирование волновых нагрузок в задачах проектирования конструкций и определения допустимых условий эксплуатации судна: автореф. дис....канд. техн. наук: 05.08.03 / Бойко Максим Сергеевич. – СПб., 2012. – 22 с.
14. Тряскин В.Н., Якимов В.В. Имитационное моделирование ледовых нагрузок на корпус судна // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 2012, №67(351). – С.149-160.
15. Туркин А.В., Береза И.Г., Туркин В.А. Использование метода имитационного моделирования при анализе аварийной ситуации "Перелив танкера" // Эксплуатация морского транспорта. – 2011, №4(66). – С.67-70.
16. Жуков Ю.И., Ключ В.В. Комплексирование функционального и имитационного моделирования в задачах обеспечения пожарной безопасности (на примере организации аварийно-спасательных работ при пожаре на судне) // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2014, Т.1, №1(5). – С.329-333.
17. Кузьменко А.В. Подход к управлению борьбой за живучесть корабля при комплексных авариях на основе методов ситуационного анализа и имитационного моделирования // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016, №2(36). – С.207-214.
18. Шахов А.В., Крамской С.А. Формирование экипажа судна на основании имитационного моделирования // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011, Т.1, №5(49). – С.69-70.
19. Медведев В.В. Обеспечение надежности и безопасности СЭУ имитационным моделированием: монография. – Germany, Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2017. – 269 с.
20. Рудниченко Н.Д. Оценки структурных рисков судовых энергетических установок // Сборник научных трудов SWorld. – 2014, Т.6, №2. – С.19-21.

21. Городецкий А.Е., Курбанов В.Г., Тарасова И.Л. Имитационное моделирование развития аварийных ситуаций в энергетических установках // Информационно-управляющие системы. – 2013, №2(63). – С.38-42.
22. Семионичев, Д.С. Управление техническим состоянием судовой энергетической установки на основе метода формализованной оценки безопасности: дис....к-та техн. наук: 05.08.05 / Семионичев Дмитрий Сергеевич. – СПб.: СПГУВК, 2010. – 231 с.
23. Vychuzhanin V., Rudnichenko N., Boyko V., Shibaeva N., Konovalov S. Devising a method for the estimation and prediction of technical condition of ship complex systems // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016, Т.6, №9(84). – P.4-11.
24. Никитин А.М. Совершенствование технического обслуживания и ремонта судовых энергетических установок на основе анализа рисков: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 25.10.2007 / Никитин Александр Мстиславович. – СПб., 2007. – 31 с.
25. Карандашов Ю.С. Математическое моделирование электрических нагрузок судовых электростанций // Судостроение. – 2004, №2. – С.31-34.
26. Герман Г.В., Хоанг Дык Туан Имитационное моделирование нагрузки отдельных потребителей судовых электростанций // Естественные и технические науки. – 2009, №1(39). – С.223-225.
27. Хоанг, Д.Т. Повышение эффективности имитационного моделирования нагрузок судовых электростанций: автореф. дис....к-та техн. наук: 05.09.03 / Хоанг Дык Туан. – СПб: СПбГМТУ, 2010. – 23 с.
28. Петин К.В., Бойкова О.Г., Чистякова Т.Б. Программный комплекс для имитационного моделирования электростанций малой мощности, созданных на базе генерирующих установок различного типа // Системы управления и информационные технологии. – 2010, Т.41, №3. – С.13-17.
29. Будашко В.В., Онищенко О.А. Математические основы имитационного моделирования системы управления энергетической установкой бурового судна // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2014, №29. – С.6-13.
30. Будашко В.В. Имплементарный подход при моделировании энергетических процессов динамически позиционирующего судна // Электротехника и электромеханика. – 2015, №6. – С.14-19.
31. Будашко В.В. Разработка трехуровневой многокритериальной стратегии управления гибридной судовой энергетической установкой комбинированного пропульсивного комплекса // Электротехника и электромеханика. – 2017, №2. – С.62-72.
32. Шураев О.П. Математическая модель судовых теплообменных аппаратов и ее применение в имитационном моделировании систем дизеля // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2010, №1. – С. 178-182.
33. Равин А.А. Диагностическое обеспечение судового энергетического оборудования: проблемы и решения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Равин Александр Александрович. – СПб., 2016. – 39 с.
34. Медведев В.В., Лакиза М.В. Оценка риска при проектировании и эксплуатации судовых теплообменных аппаратов с учетом загрязнения поверхностей теплообмена // Морской вестник. – 2016, №4(60). – С. 59-62.
35. Арутюнов Р.Ю. Использование имитационного моделирования при анализе безопасности судовых термомасляных котлов // Эксплуатация морского транспорта. – 2010, №2(60). – С.63-67.
36. Кондратьев И.А. Имитационное моделирование ледовых нагрузок на валопроводы транспортных судов: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: 05.08.05 / Кондратьев Игорь Александрович. – СПб., 1987. – 20 с.
37. Нгуен Д.Т. Учет случайных факторов при расчете крутильных колебаний валопроводов судовых дизельных установок методом главных координат: автореф. дис....канд. техн. наук: 22.03.2004 / Нгуен Динь Тьонг. – СПб., 2004. – 21 с.
38. Румб В.К. Имитационное моделирование нагрузок на валопроводы ледоколов и судов ледового плавания // Морской вестник. – 2017, №1(61). – С.60-63.
39. Берденников А.А. Имитационное моделирование работы гребной электрической установки // Системы управления и обработки информации. – 2014, №28. – С.39-46.
40. Самулеев В.И., Мухин Ю.П., Калачёв В.К. Анализ вариантов систем электродвижения с использованием роторов Флеттнера при модернизации паромов проекта 1809 // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2017, №53. – С.90-98.
41. Юсупова А.М., Дорошенко А.В. О некоторых особенностях имитационного моделирования трубопроводов // Естественные и технические науки. – 2018, №6(120). – С.221-223.
42. Равин А.А., Максимова М.А. Имитационное моделирование отказов судовой автоматизированной гидравлической системы // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2018, №50/51. – С.93-97.

#### References

1. Buslenko N.P. Modelirovaniye slozhnykh sistem. M.: Nauka, 1968. 355 s. (In Russian)
2. Shannon R.Dzh. Imitatsionnoye modelirovaniye sistem – iskusstvo i nauka. M.: Mir, 1978. 418 s. (In Russian)
3. Kobelev N.B. Vvedeniye v obshchuyu teoriyu imitatsionnogo modelirovaniya. Posobiye dlya razrabotchikov imitatsionnykh modeley i ikh pol'zovateley. M.: ООО «Print-Servis», 2007. 126 s. (In Russian)
4. Dorofeyev V.I., Klyakhin V.N., Fomichev A.B. Metody obosnovaniya napravleniy modernizatsii sudo-sborochnogo tsekha sudostroitel'nogo predpriyatiya na baze imitatsionnogo modelirovaniya. Morskoy vestnik. 2017. № 2(62). S.40-43. (In Russian)
5. Dolmatov M.A., Plotnikov A.M., Fedotov M.V., Devyatkov T.V. K voprosu ob imitatsionnom modelirovanii sudostroitel'nykh proizvodstv – universal'nyy podkhod k postroyeniyu modeley i provedeniyu eksperimentov. V sbornike: Imitatsionnoye modelirovaniye. Teoriya i praktika vos'maya Vse-rossiyskaya nauchno-prakticheskaya

- konferentsiya po imitatsionnomu modelirovaniyu i yego primene-niyu v nauke i promyshlennosti. 2017. S.366-367. (In Russian)
6. Izotov O.A., Gul'tyayev A.V. Otsenka trebuyemykh tekhnologicheskikh resursov putem statisticheskogo modelirovaniya. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2018. T.10. №3. S.497-506. (In Russian)
  7. Kuznetsov A.L., Kirichenko A.V., Tkachenko A.S., Popov G.B. Imitatsionnoye modelirovaniye kak instrument rascheta nazemnykh konteynernykh terminalov. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2018. №1. S.100-108. (In Russian)
  8. Yanchenko A.A. Nauchnyye podkhody k issledovaniyu protsessov funktsionirovaniya morskikh portov i portovykh terminalov. Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. 2018. №55. S.185-192. (In Russian)
  9. Ravin A.A., Amirli E.A. Modelirovaniye rezhimov ekstremnogo tormozheniya sudna. Sudostroyeniye. 2017. №5(834). S.12-15. (In Russian)
  10. Ovcharenko I.M. Intellectual'naya poleznaya model' avtomaticheskogo upravleniya sudnom s neyrosetevoy obrabotkoy informatsii v kontseptsii bespilotnogo sudna Ye-navigatsii. Transportnoye delo Rossii. 2018. №2. S.97-103. (In Russian)
  11. Gaykovich A.I., Lukin S.I. Postanovka zadachi optimizatsii plavuchego tyla voyenno-morskogo flota Rossii. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii. 2015. T.1. №1(27). S.15-21. (In Russian)
  12. Dikshev I.V., P'yankov I.B. Programmnyy informatsionnyy kompleks "Virtual'nyy tekhnicheski slozhnyy ob'yekt morskoy tekhniki". Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2015. № 6-2. S.52-61. (In Russian)
  13. Boyko M.S. Imitatsionnoye modelirovaniye volnovykh nagruzok v zadachakh proyektirovaniya konstruktsiy i opredeleniya dopustimyykh usloviy ekspluatatsii sudna: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.08.03. Boyko Maksim Sergeevich. SPb. 2012. 22 s. (In Russian)
  14. Tryaskin V.N., Yakimov V.V. Imitatsionnoye modelirovaniye ledovykh nagruzok na korpus sudna. Trudy TSNII im. akad. A.N. Krylova. 2012. №67(351). S.149-160. (In Russian)
  15. Turkin A.V., Bereza I.G., Turkin V.A. Ispol'zovaniye metoda imitatsionnogo modelirovaniya pri analize avariynoy situatsii "Pereliv tankera". Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2011. №4(66). S.67-70. (In Russian)
  16. Zhukov YU.I., Klyuy V.V. Kompleksirovaniye funktsional'nogo i imitatsionnogo modelirovaniya v zadachakh obespecheniya pozharney bezopasnosti (na primere organizatsii avariyno-spasatel'nykh rabot pri pozhare na sudne). Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy. 2014. T.1, №1(5). S.329-333. (In Russian)
  17. Kuz'menko A.V. Podkhod k upravleniyu bor'boy za zhivuchest' korablya pri kompleksnykh avariyyakh na osnove metodov situatsionnogo analiza i imitatsionnogo modelirovaniya. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2016. №2(36). S.207-214. (In Russian)
  18. Shakhov A.V., Kramskoy S.A. Formirovaniye ekipazha sudna na osnovanii imitatsionnogo modelirovaniya. Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. 2011. T.1. №5(49). S.69-70. (In Russian)
  19. Medvedev V.V. Obespecheniye nadezhnosti i bezopasnosti SEU imitatsionnym modelirovaniyem: mo-nografiya. Germany, Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing. 2017. 269 s. (In Russian)
  20. Rudnichenko N.D. Otsenki strukturnykh riskov sudovykh energeticheskikh ustanovok. Sbornik nauchnykh trudov SWorld. 2014. T.6. №2. S.19-21. (In Russian)
  21. Gorodetskiy A.Ye., Kurbanov V.G., Tarasova I.L. Imitatsionnoye modelirovaniye razvitiya avariynykh situatsiy v energeticheskikh ustanovkakh. Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy. 2013. №2(63). S.38-42. (In Russian)
  22. Semionichev, D.S. Upravleniye tekhnicheskim sostoyaniyem sudovoy energeticheskoy ustanovki na osno-ve metoda formalizovannoy otsenki bezopasnosti: dis. ... k-ta tekhn. nauk: 05.08.05. Semionichev Dmitriy Sergeevich. SPb.: SPGUVK, 2010. 231 s. (In Russian)
  23. Vychuzhanin V., Rudnichenko N., Boyko V., Shibaeva N., Konovalov S. Devising a method for the estimation and prediction of technical condition of ship complex systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. T.6. №9(84). P.4-11.
  24. Nikitin A.M. Sovershenstvovaniye tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta sudovykh energeticheskikh ustanovok na osnove analiza riskov: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk: 25.10.2007. Nikitin Aleksandr Mstislavovich. SPb. 2007. 31 s. (In Russian)
  25. Karandashov YU.S. Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh nagruzok sudovykh elektrostantsiy. Sudostroyeniye. 2004. №2. S.31-34. (In Russian)
  26. German G.V., Khoang Dyk Tuan Imitatsionnoye modelirovaniye nagruzki otdel'nykh potrebiteley sudovykh elektrostantsiy. Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki. 2009. №1(39). S.223-225. (In Russian)
  27. Khoang, D.T. Povysheniye effektivnosti imitatsionnogo modelirovaniya nagruzok sudovykh elektrostantsiy: avtoref. dis....k-ta tekhn. nauk: 05.09.03. Khoang Dyk Tuan. SPb: SPbGMTU. 2010. 23 s. (In Russian)
  28. Petin K.V., Boykova O.G., Chistyakova T.B. Programmnyy kompleks dlya imitatsionnogo modelirovaniya elektrostantsiy maloy moshchnosti, sozdannykh na baze generiruyushchikh ustanovok razlichnogo tipa. Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii. 2010. T.41. №3. S.13-17. (In Russian)
  29. Budashko V.V., Onishchenko O.A. Matematicheskiye osnovy imitatsionnogo modelirovaniya sistemy upravleniya energeticheskoy ustanovkoy burovogo sudna. Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2014. №29. S.6-13. (In Russian)
  30. Budashko V.V. Implementarnyy podkhod pri modelirovanii energeticheskikh protsessov dinamicheski pozitsioniruyushchego sudna. Yelektrotekhnika i yelektromekhanika. 2015. №6. S.14-19. (In Russian)
  31. Budashko V.V. Razrabotka trekhurovnevoy mnogokriterial'noy strategii upravleniya gibridnoy sudovoy energeticheskoy ustanovkoy kombinirovannogo propul'sivnoy kompleksa. Yelektrotekhnika i yelektromekhanika. 2017. №2. S.62-72. (In Ukrainian)

- 
32. Shurayev O.P. Matematicheskaya model' sudovykh teploobmennykh apparatov i yeye primeneniye v imitatsionnom modelirovaniy sistem dizelya. Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2010. №1. S. 178-182. (In Russian)
  33. Ravin A.A. Diagnosticheskoye obespecheniye sudovogo energeticheskogo oborudovaniya: problemy i re-sheniya: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. Nauk. Ravin Aleksandr Aleksandrovich. SPb. 2016. 39 s. (In Russian)
  34. Medvedev V.V., Lakiza M.V. Otsenka riska pri proyektirovaniy i ekspluatatsii sudovykh teploobmennykh apparatov s uchetom zagryazneniya poverkhnostey teploobmena. Morskoy vestnik. 2016. №4(60). S. 59-62. (In Russian)
  35. Arutyunov R.YU. Ispol'zovaniye imitatsionnogo modelirovaniya pri analize bezopasnosti sudovykh termomaslyanykh kotlov. Ekspluatatsiya morskogo transporta. 2010. №2(60). S.63-67. (In Russian)
  36. Kondrat'yev I.A. Imitatsionnoye modelirovaniye ledovykh nagruzok na valoprovody transportnykh sudov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk.: 05.08.05. Kondrat'yev Igor' Aleksandrovich. SPb. 1987. 20 s. (In Russian)
  37. Nguyen D.T. Uchet sluchaynykh faktorov pri raschete krutil'nykh kolebaniy valoprovodov sudovykh di-zel'nykh ustanovok metodom glavnykh koordinat: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 22.03.2004. Nguyen Din' Tyong. SPb., 2004. 21 s. (In Russian)
  38. Rumb V.K. Imitatsionnoye modelirovaniye nagruzok na valoprovody ledokolov i sudov ledovogo plavaniya. Morskoy vestnik. 2017. №1(61). S.60-63. (In Russian)
  39. Berdennikov A.A. Imitatsionnoye modelirovaniye raboty grebnoy elektricheskoy ustanovki. Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii. 2014. №28. S.39-46. (In Russian)
  40. Samuleyev V.I., Mukhin YU.P., Kalachov V.K. Analiz variantov sistem elektrodvizheniya s ispol'zovaniyem rotorov Flettnera pri modernizatsii paromov proyekta 1809. Vestnik Volzhskoy gosudar-stvennoy akademii vodnogo transporta. 2017. №53. S.90-98. (In Russian)
  41. Yusupova A.M., Doroshenko A.V. O nekotorykh osobennostyakh imitatsionnogo modelirovaniya truboprovodov. Yestestvennyye i tekhnicheskkiye nauki. 2018. №6(120). S.221-223. (In Russian)
  42. Ravin A.A., Maksimova M.A. Imitatsionnoye modelirovaniye otkazov sudovoy avtomatizirovannoy gidravlicheskoj sistemy. Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. 2018. №50/51. S.93-97. (In Russian)

УДК 621.039

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОТЫ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТРАКТА НА ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА МОРСКИХ АТОМНЫХ УСТАНОВОК

**Николай Николаевич Пейч**

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры энергетики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: nikpeitch@mail.ru

**Дмитрий Николаевич Шаманов**

заведующий научно-исследовательским сектором перспективных энергоустановок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: shim@smtu.ru

**Александр Валериевич Гравшин**

аспирант кафедры энергетики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: gravbin@mail.ru

### Аннотация

В составе атомных энергетических установок для повышения безопасности в аварийных ситуациях нормативные правила требуют наличия систем отвода остаточных тепловыделений основанных на пассивных принципах работы. Поскольку в пассивных системах для движения охлаждающих теплоносителей используется естественная циркуляция, то остаточное тепло может отводиться к его конечному поглотителю только вверх от реактора. Конечным поглотителем тепла в подавляющем большинстве атомных энергоустановок являются запасы воды, которые размещают на значительной высоте над реактором. Но большие массы, размещаемые выше ватерлинии, снижают остойчивость плавучего объекта. Поэтому на плавучих объектах запасы воды неизбежно ограничены, что ограничивает и длительность процесса пассивного отвода тепла и создает проблемы с достижением нормативной длительности процесса. В рассматриваемой системе пассивного отвода тепла морской атомной энергоустановки с пароводяным инжектором существует возможность отводить тепло вниз от источника тепла к морской воде, используемой в качестве конечного поглотителя. Поскольку запасы морской воды не ограничены, то увеличивается длительность пассивного режима отвода тепла вплоть до бесконечности. Такая система содержит вертикальные трубопроводы большой протяженности, в которых вследствие разности плотностей воды на подъемном и опускном трубопроводах возникает обратный движущий напор снижающий эффективность циркуляции. В статье приведены зависимости величины обратного движущего напора от высоты циркуляционного тракта и коэффициента инжекции пароводяного инжектора. Результаты расчетов представлены в графическом виде. При высоте циркуляционного тракта 15 метров и коэффициенте инжекции 15 величина обратного напора не превышает 2,3 кПа. Отмечено также, что в циклических режимах работы системы возможно обратное движение теплоносителя в трубах.

**Ключевые слова:** Остаточное тепловыделение, пассивные системы отвода тепла, пароводяной инжектор.

## INVESTIGATION OF CIRCULATION LOOP HEIGHT INFLUENCE ON HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF PASSIVE HEAT REMOVAL SYSTEM OF MARINE NUCLEAR POWER PLANTS

**Nikolay N. Peich**

the docent, candidate of technical Sciences  
the professor of department of energy  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: nikpeitch@mail.ru

**Dmitriy N. Shamanov**

head of the research sector of advanced power plants  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: shim@smtu.ru

**Alexander V. Gravshin**

post-graduate student of energy Department

State marine technical university of Saint-Petersburg  
 Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
 e-mail: grav6in@mail.ru

**Abstract**

Regulatory rules require availability of systems for the removal of residual heat based on passive principles of operation, as part of nuclear power plants, in order to improve safety in emergency situations. Since natural circulation is used in passive systems for movement of coolants, residual heat can be removed to its ultimate heat sink only upwards from the reactor. The ultimate heat sink in the vast majority of nuclear power plants is water reserves, which are located at a considerable height above the reactor. But large masses placed above the waterline, reduce the stability of a floating object. Therefore, on floating objects, water reserves are inevitably limited which limits the duration of the process of passive heat removal and creates problems with achieving the standard duration of the process. In the considered system of passive heat removal of a marine nuclear power plant with a steam-water injector, it is possible to divert heat down from the heat source to the sea water used as the ultimate heat sink. Since the reserves of sea water are not limited, the duration of the passive mode of heat removal increases to infinity. Such a system contains long-length vertical pipelines, in which, due to the difference in the density of water on the raising and downflow pipelines, a reverse driving head occurs, reducing circulation efficiency. The article presents the dependences of the magnitude of the reverse driving head on the height of the circulation path and the injection coefficient of the steam-water injector. The results of the calculations are presented in graphical form. With a height of the circulation path of 15 meters and an injection ratio of 15, the back pressure does not exceed 2.3 kPa. It was also noted that in cyclic modes of operation of the system, reverse movement of the coolant in the pipes is possible.

**Keywords:** Residual heat generation, passive heat removal systems, steam-water injector.

Для атомных энергоустановок (АЭУ) плавучих объектов характерно наличие остаточных тепловыделений в активной зоне, существующих после прекращения реакции деления. Эти тепловыделения связаны с распадом осколков деления. Мощность таких тепловыделений в первый момент составляет около 6,8% от исходной мощности реактора и со временем снижается, но продолжается бесконечно долго. Для отвода остаточных тепловыделений разрабатываются системы теплоотвода (расхолаживания), которые содержат теплообменники, циркуляционные насосы, трубопроводы и др. Но для работы таких систем необходим источник энергии (в частности электроэнергии). Отсутствие надежного теплоотвода приводит к расплавлению активной зоны и к развитию тяжелой аварии. Для отвода остаточных тепловыделений в аварийной ситуации с полной потерей все источников энергии разрабатываются системы теплоотвода основанные на пассивных принципах и не требующих внешнего источника энергии. В частности в АЭУ КЛТ-40С плавучего энергоблока «Михаил Ломоносов» отвод остаточных тепловыделений (ОТВ) активной зоны в аварийной ситуации с потерей всех источников энергии происходит в соответствии со схемой [1] приведенной на рис. 1.

Отвод ОТВ от активной зоны происходит путем естественной циркуляции (ЕЦ) теплоносителя первого контура к парогенератору. В парогенераторе тепло передается теплоносителю промежуточного контура переносящему тепло к теплообменнику системы аварийного расхолаживания (ТО САР) также за счет ЕЦ. В существующем проекте охлаждение ТО САР происходит за счет выпаривания в атмосферу запасов воды из цистерны аварийного расхолаживания (ЦАР). Запасы воды в ЦАР двух каналов расхолаживания (по 25 м<sup>3</sup> в каждой) рассчитаны на отвод тепла в пассивном режиме в течение более суток [2].

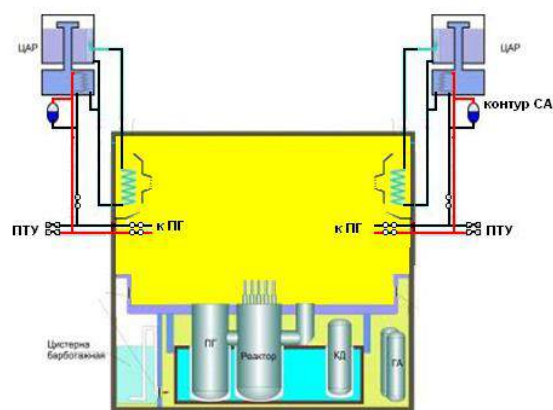


Рис. 1. Схема системы пассивного отвода тепла атомной энергоустановки КЛТ-40С плавучего энергоблока

Правилами морского регистра [3] конкретное значение длительности пассивного режима не установлено. В правилах указано «система отвода остаточных тепловыделений должна непрерывно работать в течение времени, определенного при анализе эксплуатационных и аварийных ситуаций». Для атомных станций Федеральными нормами и правилами [4] установлена длительность пассивного отвода тепла в течение 3-х суток. Очевидна актуальность поиска технических решений способных обеспечить длительности пассивного режима в течение не менее 3-х суток для перспективных плавучих объектов с АЭУ большей мощности, в том числе с целью повышения их экспортной конкурентоспособности.

Одним из таких вариантов является техническое решение, предложено в изобретении по патенту № 2631057, в котором предложено использовать образующийся в ЦАР пар для работы пароводяного инжектора (ПВИ) создающего движущий напор для обеспечения принудительной циркуляции в контуре с отводом тепла через теплообменник размещенный



ниже АЭУ и ниже ватерлинии и охлаждаемый морской водой. В этом случае конечным поглотителем тепла ОТВ становится морская вода. Такая система способна существенно продлить длительность пассивного режима отвода тепла ОТВ, т.к. запасы морской воды неограниченны. Схема системы пассивного отвода тепла (СПОТ) с ПВИ показана на рис. 2.

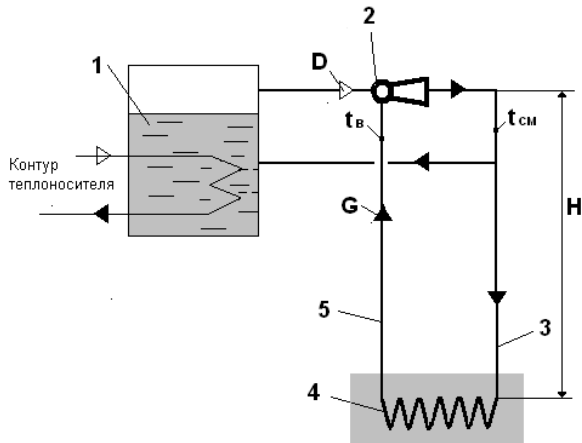


Рис. 2. Схема системы пассивного отвода тепла по патенту 2631057:

1 – цистерна аварийного расхолаживания; 2 – пароводяной инжектор; 3 – опускной трубопровод; 4 – теплообменник; 5 – подъемный трубопровод.

Поскольку для обеспечения ЕЦ в двух последовательных циркуляционных контурах (теплоноситель первого контура и промежуточный контур) ЦАР размещается значительно выше активной зоны, а теплообменник 4 должен находиться ниже ватерлинии, то ПВИ должен находиться значительно выше теплообменника 4. Поэтому значительной будет и высота циркуляционного тракта из трубопроводов 3 и 5. Но в циркуляционном тракте, состоящем из опускного трубопровода 3 и подъемного трубопровода 5, вследствие разности плотностей холодной воды в подъемном трубопроводе и горячей в опускном возникает обратный напор, способный создать обратное движение теплоносителя и препятствующий движущему напору, создаваемому ПВИ. Величина обратного напора зависит как от разности плотностей, так и от высоты циркуляционного тракта H. Разность температур, а соответственно, плотностей воды в подъемном и опускном трубопроводах в свою очередь зависит от коэффициента инжекции U развиваемого ПВИ. Ниже рассмотрены зависимости, определяющие величину обратного напора в функции от высоты циркуляционного тракта и коэффициента инжекции.

Обратный напор в циркуляционном тракте определяется зависимостью

$$\Delta P = gH(\rho_g - \rho_{cm}) = gH\Delta\rho \quad (1)$$

где  $\rho_g$  и  $\rho_{cm}$  – плотности воды на подъемном и опускном участках циркуляционного тракта; H – высота циркуляционного тракта.

Тепловая мощность, отводимая из ЦАР паром, поступающим в ПВИ определяется как

$$Q_n = D r \quad (2)$$

где D – расход пара на ПВИ;

r - теплота парообразования.

Уравнение теплового баланса теплообменника

$$Q_{mo} = Gc(t_{cm} - t_g) = Gc\Delta t \quad (3)$$

где G – расход воды;

c – теплоемкость воды (средняя в интервале температур);

$t_{cm}$  и  $t_g$  – температуры воды до и после теплообменника.

Коэффициент инжекции

$$U = \frac{G}{D} \quad (4)$$

Поскольку  $Q_n = Q_{mo}$  то

$$Dr = Gc\Delta t \quad (5)$$

С учетом (4) и после сокращения G получаем

$$\Delta t = r/Uc \quad (6)$$

Так как рассматривается кипение в ЦАР при давлении близком к атмосферному, то все температуры в циркуляционном тракте будут меньше 100 °С. Тогда в диапазоне температур 30-80 °С разность плотностей воды связана с разностью температур зависимостью

$$\Delta\rho = 0,482\Delta t \quad (7)$$

После подстановки (7) в (1) и учитывая  $c=4,19$  кДж/кг получаем

$$\Delta P = 0,115gHr/U \quad (8)$$

Результаты расчетов по зависимости (8) представлены на рис.3.

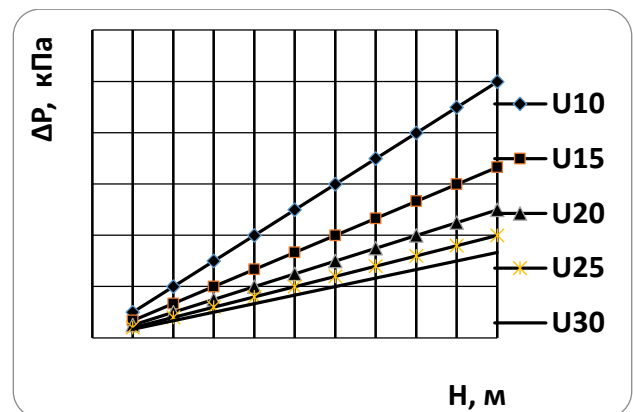


Рис.3. Зависимость обратного напора от высоты циркуляционного тракта и коэффициента инжекции

Для морских АЭУ высота циркуляционного тракта H может лежать в диапазоне 10 - 15 м. Наиболее вероятное значения коэффициента инжекции  $U>15$ . При таких условиях величина обратного напора не превышает 2,3 кПа. Величина обратного напора вычитается из величины

движущего напора создаваемого ПВИ и будет снижать расход в системе. Его влияние будет проявляться в динамических процессах. В частности при запуске циркуляции постепенное заполнение верхней части опускного трубопровода горячим теплоносителем и нижней части подъемного трубопровода охлажденным в теплообменнике теплоносителем будет увеличивать значение обратного напора и снижать расход теплоносителя в тракте. Но в свою очередь поступление более холодного теплоносителя в камеру смешения ПВИ увеличит движущий напор ПВИ. В паузе циклического режима работы системы при

отсутствии движущего напора обратный напор может создать обратное движение теплоносителя в циркуляционном тракте. Взаимодействие этих процессов может привести к возникновению колебаний расхода теплоносителя. Последнее свидетельствует о необходимости тщательного изучения нестационарных процессов в протяженном циркуляционном тракте при значительной разности высот размещения ПВИ и теплообменника.

Данные результаты должны учитываться при проектировании системы СПОТ с ПВИ для определения требований к движущему напору развиваемому ПВИ.

#### Литература

1. Бахметьев А.М., Большухин М.А., Хизбуллин А.М., Соколов А.Н. Пассивные системы безопасности инновационных проектов АЭС. III Международная конференция «АЭС: проектирование, строительство, эксплуатация», 1 декабря 2009.
2. Королев В.И., Ластовцев А.Ю., Повышение безопасности атомных плавучих объектов за счет совершенствования систем безопасности, предотвращающих выход теплоносителя в окружающую среду. Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О.Макарова, 2015, № 1(29), с. 60-68.
3. Правила классификации и постройки атомных судов и плавучих сооружений. СПб, РМРС, НД № 2-020101-069, 2012.
4. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций». НП-001-15.
5. Пейч., Шаманов Д.Н., Алексеев Д.А., Аленичев О.Н., Андреев А.Г., Гравшин А.В., Патент №2631057, Система пассивного отвода тепла реакторной установки.

#### References

1. Bahmet'ev A.M., Bol'shuhin M.A., Hizbullin A.M., Sokolov A.N. Passivnye sistemy bezopasnosti innovacionnyh proektov AYeS. III Mezhdunarodnaja konferencija «AYeS: proektirovanie, stroitel'stvo, yekspluatacija», 1 dekabrja 2009. Passive safety systems of innovative nuclear power plant projects. III international conference «NPP: design, construction, operation» 1 December 2009.
2. Korolev V.I., Lastovcev A.Y. Povyshenie bezopasnosti atomnyh plavuchih ob'ektov za schet sovershenstvovaniya sistem bezopasnosti, predotvrashayushih vyhod teponositelja v okruzhayushuyu sredu. [Improving the safety of nuclear floating objects by improving safety systems that prevent the release of coolant into the environment] Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O.Makarova [Bulletin of Admiral Makarov state University of Maritime and river fleet] 2015, № 1(29), s. 60-68.
3. Pravila klassifikacii i postrojki atomnyh sudov i plavuchih sooruzhenij. [Rules of classification and construction of nuclear vessels and floating structures] Saint-Petersburg, RMRS, ND № 2-020101-069, 2012.
4. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj ehnergii «Obshchie polozheniya obes-pecheniya bezopasnosti atomnyh stancij». [Federal norms and rules in the field of nuclear energy use "General provisions for safety of nuclear power plants"] NP-001-15.
5. Pejch., SHamanov D.N., Alekseev D.A., Alenichev O.N., Andreev A.G., Gravshin A.V., Patent №2631057, Sistema passivnogo otvoda tepla reaktornoj ustanovki [Passive heat removal system of nuclear power plant] Saint-Petersburg, 2016.

УДК 629.12.06

## УПРОЩЕННЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ СУДОВЫХ ВАЛОПРОВОДОВ

**Виктор Карлович Румб**

кандидат технических наук, профессор  
профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: vkrumb@mail.ru

**Хоанг Ван Ты**

аспирант  
кафедра судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: hoangtugl77@gmail.com

### Аннотация

В статье указаны существующие проблемы расчетов осевых колебаний судовых валопроводов дизельных энергетических установок. Отмечается, что эти проблемы связаны с трудностями решения дифференциальных уравнений гидродинамики. Рассмотрена методика решения этих уравнений методом конечных разностей. Составлена компьютерная программа, с помощью которой выполнены многовариантные расчеты с заданием исходных данных случайным образом. Результаты этих расчетов подвергнуты аппроксимирующей обработке с целью получения аналитических зависимостей для коэффициентов жесткости и демпфирования. Приведенные аппроксимирующие формулы отличаются простой и логически ясной структурой. Их наличие делает расчет осевых колебаний судовых валопроводов более корректным и оперативным. Установлено, что коэффициент жесткости является функцией только размеров упорной подушки, а коэффициент демпфирования зависит еще и от частоты вращения гребня. Особое внимание уделено оценке точности расчета коэффициентов жесткости и демпфирования по предлагаемым формулам. Показано, что расхождение между результатами расчетов, полученных из решения интегральных уравнений гидродинамики и по предлагаемым формулам, не превышает 6 процентов.

**Ключевые слова:** осевые колебания, упорный подшипник, масляный слой, уравнения гидродинамики, коэффициенты демпфирования и податливости

## A SIMPLIFIED APPROACH TO THE DETERMINATION OF THE HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF THRUST BEARINGS IN SHIP PROPULSION SYSTEMS

**Viktor K. Rumb**

Candidate of Technical Science, Professor  
Professor of Department "Ship Internal Combustion Engines and Diesel Engines"  
Saint-Petersburg State Marine Technical University  
190008, Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: vkrumb@mail.ru

**Hoang Van Tu**

Postgraduate Student  
Department "Ship Internal Combustion Engines and Diesel Engines"  
Saint-Petersburg State Marine Technical University  
190008, Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: hoangtugl77@gmail.com

### Abstract

The article indicates the existing problems of calculating the axial vibrations of ship shafts of diesel power plants. It is noted that these problems are associated with the difficulties of solving hydrodynamic differential equations. The methodology for solving these equations by the finite difference method is considered. A compiled computer program by the help of which multivariate calculations were performed with the assignment of initial data in a random way. The results of these calculations are subjected to approximation processing in order to obtain analytical dependencies for stiffness and damping coefficients. The given approximate formulas are characterized by a simple and logically clear structure. Their presence makes the calculation of axial vibrations of ship shafts more correct and operational. It is established that the stiffness coefficient is a function of only the dimensions of the thrust pad, and the damping coefficient also depends on the rotational frequency of the thrust collar. Special attention is given to assessing the accuracy of the calculation of stiffness and damping coefficients using the

proposed formulas. It is shown that the discrepancy between the results of calculations obtained from the solution of integral equations of hydrodynamic and the proposed formulas does not exceed 6 percent.

**Keywords:** axial vibrations, thrust bearing, oil film, hydrodynamic equations, damping and compliance coefficients

**Введение**

При расчете осевых колебаний судовых валопроводов одной из проблемных задач остается задача по определению упругих и демпфирующих свойств упорного подшипника [1]. С математической точки зрения их определение наталкивается на практически непреодолимые трудности, связанные, прежде всего, с неопределенностью динамических характеристик масляного слоя, заключенного между гребнем и подушками подшипника. Через этот слой упор от гребного винта передается корпусу судна, и таким образом закономерности развития осевых колебаний во многом определяются законами гидродинамики масляного слоя. Из-за этой неопределенности до сих пор при расчете осевых колебаний податливостью (величиной обратной жесткости) упорного подшипника задаются по опытным данным. В частности, для встроенных подшипников в двигатель осевую податливость выбирают в диапазоне от  $10 \cdot 10^{-11}$  до  $80 \cdot 10^{-11}$  м·Н<sup>-1</sup>, при этом рекомендуется производить параметрический анализ учета этой податливости. Понятно, что такой, по существу, случайный подход к заданию податливости упорного подшипника будет сказываться на точности прогнозирования частот свободных колебаний, соответственно и на резонансных оборотах валопровода. Еще более неопределенной является оценка демпфирования упорного подшипника, т.е. фактора, от которого во многом зависят амплитуды резонансных колебаний. Коэффициент демпфирования рекомендуется принимать по опытным данным.

Все это является свидетельством существующей проблемы определения коэффициентов жесткости и демпфирования масляного слоя упорного подшипника. Попытка их определения через решения уравнений гидродинамики смещает акценты задачи в область вычислительной математики, а ее технической сути отводится второстепенное значение. В этих условиях оправдано пользоваться простыми аналитическими зависимостями, которые по точности результатов дают весьма близкие значения к численным решениям. Именно получению таких зависимостей посвящена настоящая статья.

Конструктивно встроенный упорный подшипник (рис. 1) состоит из: гребня (2), изготовленного за одно целое с коленчатым валом (1), упорных подушек (колодок) (3) в виде секторов с профилированной упорной поверхностью и стопоров (4), которые одновременно служат местом опирания подушек и их фиксации. Профилированием подушек обеспечивают зазор клиновидной формы, поэтому масло, прилипшее к поверхности вращающегося гребня, вовлекается в этот зазор и создает тем самым гидродинамическое давление, увеличивающееся по мере сужения зазора. Теоретической основой для определения гидродинамического давления и его изменения по зазору служит уравнение Рейнольдса. Если исходить из малой толщины масляной пленки и постоянства

вязкости масла, соответствующей его температуре на входе в двигатель, то данное уравнение в цилиндрических координатах принимает вид [2]

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( rh^3 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( h^3 \frac{\partial p}{r \partial \varphi} \right) = 12\mu \vartheta_z r + 6\mu \frac{\partial}{\partial r} (rh\vartheta_r) + 6\mu \frac{\partial}{\partial \varphi} (h\vartheta_\varphi) \quad (1)$$

где  $p$  - распределение давления на поверхности подушки;  $\mu$  - динамическая вязкость масла;  $h$  - толщина масляного слоя;  $\vartheta_r$ ,  $\vartheta_\varphi$  и  $\vartheta_z$  - составляющие скорости точек на поверхности гребня в радиальном, окружном и осевом направлениях (рис.2).

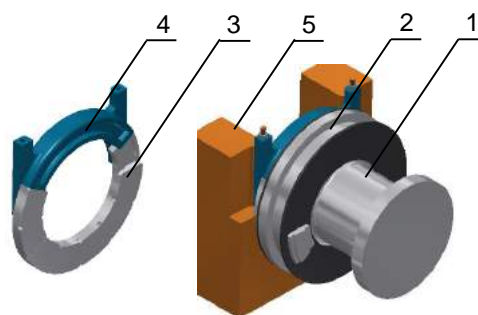


Рис. 1. Конструкция встроенного упорного подшипника

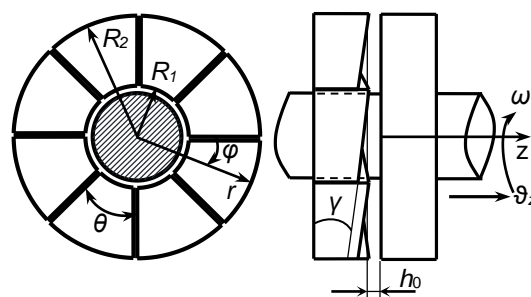


Рис.2. Геометрия гребня и подушки упорного подшипника

Для гидродинамических самоустанавливающихся упорных подшипников с наклонными рабочими поверхностями подушек величина осевого зазора одновременно зависит от радиуса  $r$  и угла  $\varphi$ . На этом основании зависимость для толщины  $h$  получается из чисто геометрических рассуждений. Если считать подушку недеформируемой, то согласно [4, 6]

$$h(r, \varphi) = h_0 + r \sin \varphi \operatorname{tg} \gamma = h_0 + r \gamma \sin \varphi, \quad (2)$$

где  $h_0$  - установочный зазор,  $\gamma$  - угол наклона подушки (см. рис. 2), ввиду малости  $\operatorname{tg} \gamma \approx \gamma$ .

Напомним, формула (1) с учетом зависимости (2) полностью решает задачу о распределении гидродинамического давления в масляном слое одной подушки. Соответственно гидродинамическая реакция всех упорных подушек получается интегрированием выражения для давления

$$F = z \int_0^{\theta} \int_{R_1}^{R_2} p(r, \varphi) r dr d\varphi \quad (3)$$

где  $z$  - число упорных подушек.

Аналогичным образом могут быть подсчитаны искомые коэффициенты жесткости и демпфирования масляного слоя по формулам [3, 7]

$$K = z \int_0^{\theta} \int_{R_1}^{R_2} \left( \frac{\partial p}{\partial h} \right) r dr d\varphi \quad (4)$$

$$B = z \int_0^{\theta} \int_{R_1}^{R_2} \left( \frac{\partial p}{\partial \vartheta_z} \right) r dr d\varphi \quad (5)$$

Простота приведенных формул кажущаяся. Объясняется это тем, что уравнение Рейнольдса допускает точное аналитическое решение лишь для простейших частных случаев. При определении демпфирующих и упругих свойств масляного слоя реального упорного подшипника приходится прибегать к упрощениям и применять численные методы интегрирования. Классическим упрощением служит замена размерных величин их безразмерными аналогами [5]. Приведение исходных уравнений к безразмерному виду несколько усложняет первоначальные преобразования, однако существенно облегчает дальнейшие вычисления, поскольку все параметры выражаются простыми числами одного порядка – единицы. Это, в свою очередь, позволяет избежать больших ошибок при численной реализации формул и получить общие закономерности распределения гидродинамического давления по рабочей поверхности упорной подушки.

При решении задачи о гидродинамических характеристиках смазочного слоя используются следующие безразмерные величины (они помечены чертой) [6, 8]

$$\bar{r} = \frac{r}{R_2}; \quad \bar{h} = \frac{h}{h_0}; \quad \bar{\mu} = \frac{\mu}{\mu_0}; \quad \bar{\vartheta}_r = \frac{\vartheta_r}{\omega R_2};$$

$$\bar{\vartheta}_\varphi = \frac{\vartheta_\varphi}{\omega r}; \quad \bar{\vartheta}_z = \frac{\vartheta_z}{\omega h_0}; \quad \bar{p} = \frac{p h_0^2}{R_2^2 \omega \mu_0}.$$

С учетом этих величин приведенные выше уравнения после несложных преобразований могут быть представлены в безразмерном виде так

$$\frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial \bar{r}^2} + A \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}} + \frac{\partial^2 \bar{p}}{\bar{r}^2 \partial \varphi^2} + C \frac{\partial \bar{p}}{\bar{r} \partial \varphi} = D + E; \quad (6)$$

$$\bar{h} = 1 + \gamma R_2 \bar{r} \sin \varphi / h_0;$$

$$F = \frac{z R_2^4 \omega \mu_0}{h_0^3} \bar{F}; \quad \bar{F} = \int_0^{\bar{r}_N} \int \bar{p}(\bar{r}, \varphi) \bar{r} d\bar{r} d\varphi \quad (7)$$

$$K = z \frac{R_2^4 \omega \mu_0}{h_0^3} \int_0^{\bar{r}_N} \int \left( \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{h}} \right) \bar{r} d\bar{r} d\varphi = \frac{z R_2^4 \omega \mu_0}{h_0^3} \bar{K} \quad (8)$$

$$B = z \frac{R_2^4 \mu_0}{h_0^3} \int_0^{\bar{r}_N} \int \left( \frac{\partial \bar{p}}{\partial \vartheta_z} \right) \bar{r} d\bar{r} d\varphi = \frac{z R_2^4 \mu_0}{h_0^3} \bar{B} \quad (9)$$

В этих формулах приняты следующие обозначения:

$$A = \left( \frac{1}{\bar{r}} + \frac{3}{\bar{h}} \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{r}} \right); \quad C = \frac{3}{\bar{h}} \frac{\partial \bar{h}}{\bar{r} \partial \varphi}; \quad D = \frac{12 \bar{\mu} \cdot \bar{\vartheta}_z}{\bar{h}^3};$$

$$E = \frac{6 \bar{\mu}}{\bar{h}^3} \left[ \bar{h} \cdot \frac{\partial \bar{\vartheta}_r}{\partial \bar{r}} + \left( \frac{\bar{h}}{\bar{r}} + \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{r}} \right) \bar{\vartheta}_r \right] + \left[ \bar{h} \cdot \frac{\partial \bar{\vartheta}_\varphi}{\bar{r} \partial \varphi} + \frac{\partial \bar{h}}{\bar{r} \partial \varphi} \bar{\vartheta}_\varphi \right];$$

$$\bar{K} = \frac{\bar{F}(h_0 + \Delta h_0) - \bar{F}(h_0 - \Delta h_0)}{2 \Delta h_0};$$

$$\bar{B} = \frac{\bar{F}(\vartheta_{z0} + \Delta \vartheta_{z0}) - \bar{F}(\vartheta_{z0} - \Delta \vartheta_{z0})}{2 \Delta \vartheta_{z0}}; \quad \vartheta_{z0} = \omega h_0.$$

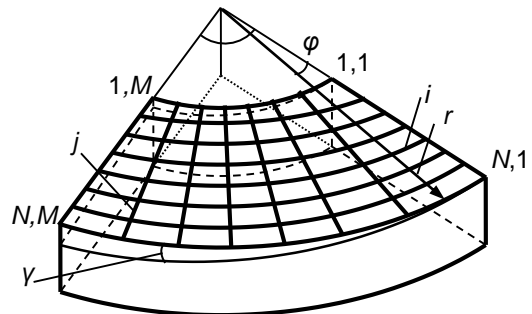


Рис. 3. Разбивка рабочей поверхности упорной подушки

Как уже отмечалось интегрирование уравнений гидродинамики масляного слоя возможно только с применением численных методов. Для этого в инженерных расчетах чаще всего применяется метод конечных разностей (метод сеток). Его достоинства: простота реализации, наглядность алгоритма, приемлемая точность, возможность решения двумерных дифференциальных уравнений. Суть этого способа заключается в том, что рабочая поверхность подушки радиальными прямыми и дугами окружностей разделяется на сетки, рис. 3. Для каждого узла сетки заданное дифференциальное уравнение заменяется соответствующим алгебраическим конечно-разностным аналогом. Например, для узла с номером  $i, j$  частные производные уравнения заменяются выражениями

$$\frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial \bar{r}^2} \approx \frac{\bar{p}_{i+1,j} - 2\bar{p}_{i,j} + \bar{p}_{i-1,j}}{\Delta \bar{r}^2}; \quad \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}} \approx \frac{\bar{p}_{i+1,j} - \bar{p}_{i-1,j}}{2 \Delta \bar{r}};$$

$$\frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial \varphi^2} \approx \frac{\bar{p}_{i,j+1} - 2\bar{p}_{i,j} + \bar{p}_{i,j-1}}{\Delta \varphi^2}; \quad \frac{\partial \bar{p}}{\partial \varphi} \approx \frac{\bar{p}_{i,j+1} - \bar{p}_{i,j-1}}{2 \Delta \varphi}.$$

В результате подобной замены получается алгебраическое уравнение, которое путем несложных преобразований можно привести к виду

$$\bar{p}_{i,j} = AA \bar{p}_{i+1,j} + BB \bar{p}_{i-1,j} + CC \bar{p}_{i,j+1} + DD \bar{p}_{i,j-1} - EE,$$

где  $AA = \frac{(2 + A \Delta \bar{r}) \bar{r}_i^2 \Delta \varphi^2}{4(\Delta \bar{r}^2 + \bar{r}_i^2 \Delta \varphi^2)}$ ;  $BB = \frac{(2 - A \Delta \bar{r}) \bar{r}_i^2 \Delta \varphi^2}{4(\Delta \bar{r}^2 + \bar{r}_i^2 \Delta \varphi^2)}$ ;

$$CC = \frac{(2 + C\Delta\varphi\bar{r}_i)\Delta\bar{r}^2}{4(\Delta\bar{r}^2 + \bar{r}_i^2\Delta\varphi^2)}; DD = \frac{(2 - C\Delta\varphi\bar{r}_i)\Delta\bar{r}^2}{4(\Delta\bar{r}^2 + \bar{r}_i^2\Delta\varphi^2)};$$

$$EE = \frac{(D + E)\bar{r}_i^2\Delta\bar{r}^2\Delta\varphi^2}{2(\Delta\bar{r}^2 + \bar{r}_i^2\Delta\varphi^2)}.$$

Таким образом, перевод уравнения Рейнольдса в конечно-разностную форму приводит к системе линейных алгебраических уравнений. Понятно, что число уравнений в системе равно количеству узлов сетки и чем больше узлов и тем меньше размер ячейки сетки, тем точнее результаты вычислений. Решать эту систему уравнений можно любыми доступными способами, но эффективнее и удобнее это делать с привлечением метода Гаусса-Зейделя. При этом нахождение давлений  $\bar{p}_{i,j}$  в узлах сетки осуществляется итерационным процессом, в результате которого одновременно должны быть удовлетворены начальные и граничные условия: начальные условия – давление масла на входе в подшипник; граничные условия – нулевые гидродинамические давления на контуре подушки. Итерационный вычислительный процесс продолжается до тех пор, пока не будет выполнено неравенство [8]

$$\sum_{i=2}^{N-1} \sum_{j=2}^{M-1} \left| \frac{(\bar{p}_{i,j}^{k+1} - \bar{p}_{i,j}^k)}{\bar{p}_{i,j}^{k+1}} \right| \leq \varepsilon$$

где  $\bar{p}_{i,j}^k$  и  $\bar{p}_{i,j}^{k+1}$  – давления, получаемые соответственно на предыдущей и текущей итерациях,  $\varepsilon$  – задаваемое число, например  $\varepsilon = 0,0001$ .

Изложенное выше следует рассматривать как словесный алгоритм, реализация которого решает задачу по определению эпюры давления в масляном слое. В полном соответствии с этим алгоритмом написана программа в среде Matlab. Работоспособность программы иллюстрирует рис. 4, где показаны эпюры гидродинамического давления для упорного подшипника с восьмью подушками.

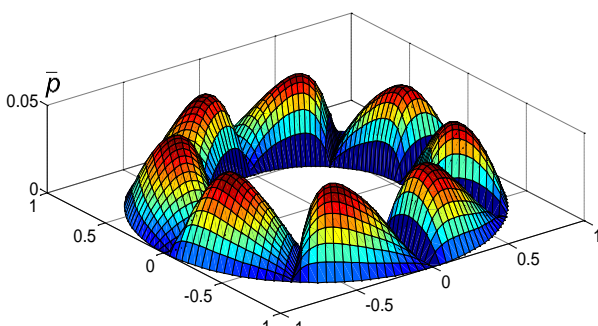


Рис. 4. Эпюры гидродинамического давления на подушки упорного подшипника

Следует отметить, что нахождение давлений в масляном слое не относится к простой вычислительной процедуре, а поэтому реализация данного алгоритма становится малопригодной для оперативных расчетов. В этом отношении более удобными в инженерных расчетах являются

зависимости калькуляторного типа, которые, несмотря на сравнительную простоту, дают решения с точностью, приемлемой для решения практических задач. Это обстоятельство вынудило разработать упрощенный подход к определению безразмерных коэффициентов жесткости  $\bar{K}$  и демпфирования  $\bar{B}$ . Его основу составляет аппроксимация интегральных решений, полученных методом конечных разностей, простыми аналитическими формулами. С этой целью были выполнены расчеты с исходными данными, варьируемыми случайным образом в пределах их изменения, табл. 1. Результаты этих расчетов в виде осредненных графиков для искомых безразмерных коэффициентов жесткости и демпфирования показаны на рис. 5 и 6. Соответствующие им аппроксимирующие полиномы имеют вид (10) и (11).

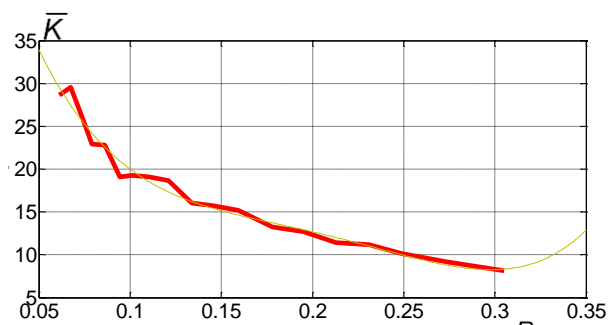


Рис. 5. Коэффициент  $\bar{K}$  в зависимости от внутреннего радиуса подушки

При рассмотрении приведенных полиномов обращает на себя внимание следующее:

- безразмерный коэффициент жесткости масляного слоя зависит только от геометрии упорной подушки, т.е.  $\bar{K} = f(R_1, \alpha)$ , см. рис. 5;

- безразмерный коэффициент демпфирования является функцией геометрии подушки и угловой скорости гребня, т.е.  $\bar{B} = f(R_1, \alpha, \omega)$ , см. рис.6.

Естественно напрашивается вопрос по точности расчета коэффициентов  $\bar{K}$  и  $\bar{B}$  по формулам (10) и (11). Ответом на данный вопрос служит табл. 2, в которой представлены результаты расчета гидродинамического давления упорного подшипника по методу конечных разностей и по предлагаемым формулам. Из таблицы видно, что в целом расчетные величины искомых коэффициентов достаточно близки друг другу. Расхождение между ними не превышает 6%. Напомним, подобная погрешность свойственна и расчетам по методу конечных разностей, прежде всего, из-за итерационного численного решения уравнения (6). Таким образом, сравнительный анализ расчетных значений коэффициентов  $\bar{K}$  и  $\bar{B}$  дает право утверждать: предлагаемые упрощенные формулы (10) и (11) обеспечивают вполне приемлемую точность расчета указанных коэффициентов, а поэтому их допустимость для определения параметров дискретной модели упорного подшипника очевидна и не требует дополнительных доказательств.

$$\bar{K} = \frac{1}{k} (26503R_1^4 - 22112R_1^3 + 6786,6R_1^2 - 958,96R_1 + 67,495); \tag{10}$$

$$\bar{B} = \frac{1}{K} (A_4\omega^4 - A_3\omega^3 + A_2\omega^2 - A_1\omega + A_0), \tag{11}$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от отношения  $\alpha = R_1/R_2$ , подсчитывается по формуле

$$k = 307,96 \alpha^4 - 617,65 \alpha^3 + 473,29 \alpha^2 - 162,46 \alpha + 21,808 ;$$

$A_i$  ( $i = 0,1,\dots,4$ ) – коэффициенты, входящие в формулу (11)

$$A_0 = -1226,7R_1^3 + 904,79R_1^2 - 230,17R_1 + 22,456 ;$$

$$A_1 = -205,05R_1^3 + 151,26R_1^2 - 38,483R_1 + 3,755 ;$$

$$A_2 = -15,075R_1^3 + 11,119R_1^2 - 2,8287R_1 + 0,276 ;$$

$$A_3 = -0,49954R_1^3 + 0,36847R_1^2 - 0,093735R_1 + 0,009145 ;$$

$$A_4 = -0,006095R_1^3 + 0,0044957R_1^2 - 0,0011436R_1 + 0,0001116 .$$

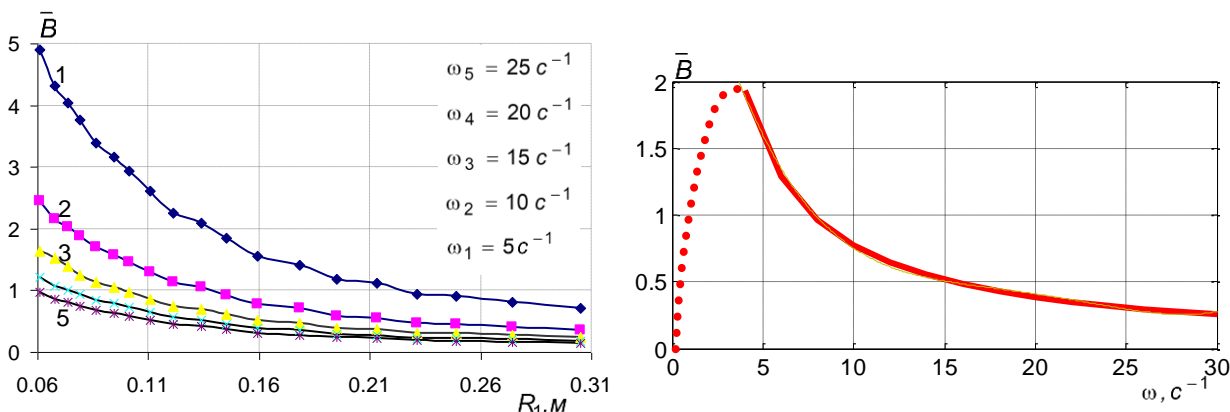


Рис. 6. Зависимость коэффициента  $\bar{B}$  от внутреннего радиуса подушки и угловой скорости

Таблица 1

Геометрические и рабочие параметры упорного подшипника

Наименование параметра	Обозначение	Диапазон изменения
Наружный радиус подушки, м	$R_2$	0,115...0,565
Внутренний радиус подушки, м	$R_1$	0,061...0,305
Осевой зазор в подшипнике, мм	$h_0$	0,4...1,2
Число подушек	$z$	6...12
Рабочий угол подушки, град.	$\theta$	30...60
Угол наклона подушки, град.	$\gamma$	0,1...0,3
Угловая скорость гребня, $c^{-1}$	$\omega$	4...30

Таблица 2

Расчетные значения коэффициентов жесткости и демпфирования

Исходные данные	Коэффициенты жесткости ( $Нм^{-1}$ ), подсчитанные по формулам			Коэффициенты демпфирования ( $кг \cdot c^{-1}$ ), подсчитанные по формулам		
	(8)	(10)	Разница	(9)	(11)	Разница
$R_2=0,565$ м, $R_1=0,305$ м, $h_0=1,2$ мм, $z=8$ , $\theta=45^\circ$ , $\gamma=0,2^\circ$ , $\omega=15$ $c^{-1}$	$2,219 \cdot 10^9$	$2,202 \cdot 10^9$	0,76 %	$4,315 \cdot 10^6$	$4,084 \cdot 10^6$	5,37 %
$R_2=0,299$ м, $R_1=0,159$ м, $h_0=0,7$ мм, $z=8$ , $\theta=45^\circ$ , $\gamma=0,2^\circ$ , $\omega=15$ $c^{-1}$	$1,698 \cdot 10^9$	$1,632 \cdot 10^9$	3,89 %	$3,869 \cdot 10^6$	$3,817 \cdot 10^6$	1,34 %
$R_2=0,330$ м, $R_1=0,229$ м, $h_0=0,8$ мм, $z=8$ , $\theta=45^\circ$ , $\gamma=0,2^\circ$ , $\omega=15$ $c^{-1}$	$6,216 \cdot 10^8$	$6,288 \cdot 10^8$	1,17 %	$1,298 \cdot 10^6$	$1,254 \cdot 10^6$	3,34 %



### Заключение

В заключении напомним, судовой валопровод играет решающую роль в работоспособности всего движительного комплекса. Его отказы зачастую приводят к аварийным ситуациям с потенциальной угрозой для жизни экипажа и судна в целом. Во многом работоспособность валопровода определяется корректностью расчетов его осевых колебаний, которые особенно сильно стали проявляться на судах с длинноходными малооборотными дизелями. Несмотря на значимость, расчет осевых колебаний остается пока

весьма неопределенным в вычислительном отношении из-за отсутствия простых аналитических зависимостей для определения коэффициентов жесткости и демпфирования масляного слоя упорного подшипника. Не претендуя на первенство, отметим, что все изложенное в статье – это не что иное, как методическое описание процедуры получения таких зависимостей путем аппроксимации численных решений дифференциальных уравнений гидродинамики. Полученные в конечном итоге алгебраические полиномы позволяют подсчитывать искомые коэффициенты достаточно оперативно и весьма точно при минимальных исходных данных.

### Литература

1. Румб В.К., Хоанг Ван Ты. Особенности расчета осевых колебаний судовых валопроводов // Двигателестроение, № 1 (271), 2018. С. 3-7.
2. Подольский М.Е. Упорные подшипники скольжения: теория и расчет // М.Е.Подольский. – Л.: Машиностроение, 1981. – 261 с.
3. Хлопенко Н. Я. Расчет динамических характеристик главных упорных подшипников судовых валопроводов // Трение и износ, 1990. С. 295 – 303.
4. Wu Z. X., Liu Z. L. Analysis of properties of thrust bearing in ship propulsion system // Journal of marine science and application, Vol. 9, 2010. p. 220-226.
5. Srikanth D.V., Chaturvedi K.K., Reddy A.C.K., Determination of pad thickness in a large thrust bearing // Nova Science Publishers, Inc. Vol 3, No. 1/2, 2009. p. 67-86.
6. Kittipong Boonlong, Puttha Jeenkour, Numerical study on axial vibration of water-lubricated small thrust bearing considering grooved pad // Vibroengineering procedia, Vol. 16, Dec. 2017. p. 13-18.
7. Ganbo Zhang, Yao Zhao, Tianyun Li, Xiang Zhu, Propeller excitation of longitudinal vibration characteristics of marine propulsion shafting system // Shock and Vibration, Vol. 2014. 19 p.
8. Farooq A. N., Harmain G. A. Numerical investigation of pressure profile in hydrodynamic lubrication thrust bearing // International scholarly research notices, Vol. 2014. 8 p.

### 9. References

1. Rumb V.K., Hoang Van Tu. Analysis of marine shafting axial vibration // Dvigatolestroyeniye, № 1 (271), 2018. p. 3–7.
2. Podolsky M.E. Thrust bearings: theory and calculation // M.E. Podolsky. - L.: Mechanical engineering, 1981. - 261 p.
3. Khlopenko N. Ya. Calculation of the dynamic characteristics of the main thrust bearings of ship shafting // Friction and wear, 1990. p. 295 - 303.
4. Wu Z. X., Liu Z. L. Analysis of properties of thrust bearing in ship propulsion system // Journal of marine science and application, Vol. 9, 2010. p. 220-226.
5. Srikanth D.V., Chaturvedi K.K., Reddy A.C.K., Determination of pad thickness in a large thrust bearing // Nova Science Publishers, Inc. Vol 3, No. 1/2, 2009. p. 67-86.
6. Kittipong Boonlong, Puttha Jeenkour, Numerical study on axial vibration of water-lubricated small thrust bearing considering grooved pad // Vibroengineering procedia, Vol. 16, Dec. 2017. p13-18.
7. Ganbo Zhang, Yao Zhao, Tianyun Li, Xiang Zhu, Propeller excitation of longitudinal vibration characteristics of marine propulsion shafting system // Shock and Vibration, Vol. 2014. 19 p.
8. Farooq A. N., Harmain G. A. Numerical investigation of pressure profile in hydrodynamic lubrication thrust bearing // International scholarly research notices, Vol. 2014. 8 p.

УДК 621.436

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СУДОВОГО ДВУХТОПЛИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Владимир Васильевич Гаврилов**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры теории и конструкции судовых двигателей внутреннего сгорания  
Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова  
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: Gavrilov@vg5647.spb.edu

**Валерий Викторович Медведев**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и  
дизельных установок

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

**Дмитрий Дмитриевич Богачёв**

магистрант кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: dougle305@gmail.com

### Аннотация

В работе представлены принципы и предложены средства обеспечения высоких технико-экономических и экологических показателей судового двухтопливного двигателя. Отмечено, что при работе двигателя в режиме дизеля требуется значительно более высокая степень сжатия рабочего тела, чем в режиме газодизеля. Предложено в процессе смены вида топлива изменять действительную степень сжатия посредством изменения положения точки закрытия впускных клапанов на такте сжатия. Для уменьшения потерь газа из рабочего цилиндра при переводе двигателя в режим газодизеля следует сократить период перекрытия клапанов. Для реализации решений об управлении фазами газораспределения предложено использовать механическую систему, аналогичную традиционной системе реверсирования двигателя, в которой вал газораспределительного механизма снабжён двумя комплектами кулаков, обеспечивающих два различных сочетания фаз газораспределения. Один комплект используется при работе двигателя в режиме дизеля, другой – в режиме газодизеля.

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, газовый двигатель с пилотным впрыскиванием, степень сжатия, детонация, эффективность рабочего цикла, механизм газораспределения.

## IMPROVEMENT OF WORKING PROCESS IN MARINE DUAL-FUEL ENGINE

**Vladimir V. Gavrilov**

Dr. Sci. Tech., professor, professor of department of the theory and design of marine combustion engine  
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
5/7, Dvinskaya street, Saint-Petersburg, 198035, Russian Federation  
e-mail: gavrilov@vg5647.spb.edu

**Valery V. Medvedev**

Dr. Sci. Tech., associate professor, professor of department of marine combustion engine and diesel plant  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

**Dmitrij D. Bogachev**

Master's degree student  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: dougle305@gmail.com

### Abstract

The article presents the principles and proposed ways to ensure high technical, economic and environmental performance of marine two-fuel engine. It is noted that when the engine is operated in diesel mode, a significantly higher degree of compression of the cylinder charge is required than in gas mode. It is proposed to change the actual compression ratio in the process of changing the fuel type by changing the position of the closing point of the intake valves during the compression stroke. To reduce gas losses from the cavity of the working cylinder when the engine is switched to the gas engine operating mode, the valve overlap period should be reduced. For implementation of recommendations on management of phases of gas distribution it is offered to use the mechanical system similar to traditional system of reversal of the engine in which the shaft of the gas distribution mechanism is equipped with

two sets of fists providing two various combinations of phases of gas distribution. One set is used when the engine is running in diesel mode, the other-in gas.

**Key words:** diesel engine, pilot injection gas engine, compression ratio, detonation, the efficiency of the operating cycle, valves control mechanism.

### Введение

В числе основных обстоятельств, определяющих направления развития современной транспортной энергетики, необходимо указать следующие:

– несмотря на наблюдающееся колебание мировых цен на топливо, в целом их уровень неуклонно повышается;

– благодаря открытию новых газовых месторождений природный газ в настоящее время существенно дешевле топлива нефтяного происхождения;

– вступают в силу всё более жёсткие требования к экологическим показателям техники, в частности, требования по ограничению вредных выбросов.

В этих условиях природный газ, ввиду его относительно малой стоимости, высокой калорийности, малого содержания серы, благоприятного состава отработавших газов, становится одним из основных видов топлива для транспортных установок.

На рис. 1 показано относительное содержание токсичных компонентов в отработавших газах поршневых двигателей, работающих на различных топливах [1]. При этом за 100% принято содержание компонентов (за исключением сажи) в бензиновых двигателях.

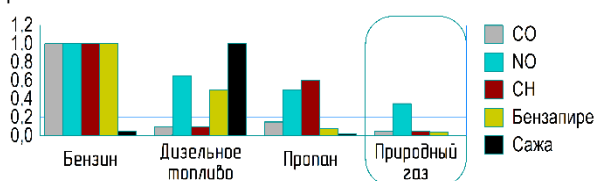


Рис. 1 Относительное содержание токсичных компонентов в отработавших газах поршневых двигателей

Из рисунка следует очевидное преимущество природного газа.

Работа двигателя на газовом топливе даёт много других преимуществ [2]. Газ обладает хорошей антидетонационной способностью (октановое число — на уровне 110 и выше); его можно сжигать при меньших концентрациях, чем дизельное топливо или бензин, то есть при более "бедных" смесях. При сгорании газа образуется меньше твердых частиц и золы, вызывающих повышенный износ деталей двигателя. Уменьшенный износ цилиндропоршневой группы достигается вследствие того, что газ в испарённом состоянии не смывает масляную плёнку со стенок рабочих цилиндров двигателя, и плёнка более длительное время удерживается на металлических поверхностях. Ввиду того, что газ не «разжижает» смазочное масло и практически не засоряет его продуктами горения, масло можно менять реже, чем при эксплуатации на дизельном топливе или бензине. Важно, что газ практически не вызывает коррозию металла.

Наряду с перечисленными преимуществами газовое топливо имеет ряд существенных

недостатков. Среди них – трудности хранения и транспортировки, повышенные пожаро- и взрывоопасность, токсичность и другие. Для нивелирования влияния недостатков газа приходится решать сложные проблемы научно-технического и производственного характера.

Результатом влияния указанных недостатков является весьма медленное развитие инфраструктуры снабжения газом территорий России, в частности, российских портов.

В качестве средства, с одной стороны, реализации описанных преимуществ природного газа и, с другой стороны, компенсации отмеченных его недостатков в последние годы всё более широкое распространение получают так называемые *двухтопливные двигатели* (ДД), которые иногда не вполне правомерно называют «двигателями бинарного топлива». ДД – это двигатели, которые могут работать либо на жидком топливе (в режиме дизеля), либо на газе при осуществлении самовоспламенения малой порции запального («пилотного») дизельного топлива (в режиме газодизеля). При этом переход с одного вида топлива на другой можно производить «на ходу» двигателя, без его остановки. Важно отметить, что при использовании ДД имеется возможность выбирать тот или иной вид топлива в зависимости от его доступности и цены. При возникновении каких-либо проблем при работе на газе всегда имеется возможность перевода двигателя на дизельное топливо.

Технико-экономические показатели двигателя в значительной степени определяются характером и качеством процесса горения топлива. Условия протекания горения в указанных двух режимах работы ДД весьма различны. На наш взгляд, в настоящее время при решении вопросов организации рационального рабочего процесса ДД недостаточно учитываются различия в условиях горения на рассматриваемых режимах его работы. Поэтому *цель настоящего исследования* состоит в формулировании основных принципов и поиске средств обеспечения высокого качества рабочего процесса судового двухтопливного двигателя.

### 1. Проблемы организации рабочего процесса в двигателе двойного топлива

Одна из важнейших проблем состоит в том, что при работе ДД в режиме дизеля степень сжатия необходимо иметь на уровне не ниже 15 – 17, чтобы обеспечить достаточно высокий его КПД. Но при работе в режиме газодизеля степень сжатия не следует допускать выше 12 – 13 [2] во избежание детонации при горении газозооной смеси.

В отличие от процесса горения в дизеле, в котором распространение пламени обусловлено преимущественно процессами диффузии и теплопроводности, в условиях газодизеля в гомогенной газозооной смеси при определённых условиях может возникнуть ударная волна и следующая за её фронтом зона химического

превращения смеси. Описываемое совместное распространение механической ударной волны и фронта пламени представляет собой так называемую детонационную волну.

Отрицательное влияние детонационной волны на внутрицилиндровые процессы можно рассмотреть в двух основных аспектах. Во-первых, детонационное горение характеризуется повышенной так называемой жёсткостью процесса, которая представляет собой скорость повышения давления в цилиндре, и ростом максимума давления рабочего цикла. Повышенная жёсткость проявляется в виде ударной нагрузки на детали двигателя, что может резко ухудшить условия их работы и существенно снизить надёжность двигателя вплоть до его разрушения. Во-вторых, в виду высокой скорости и взрывного характера детонационного сгорания часть топлива и промежуточных продуктов сгорания «разбрасываются» по объёму камеры, перемешиваются с конечными продуктами и не успевают полностью сгореть [3]. Выпуск отработавших газов становится «дымным». Ввиду наличия несгоревшего топлива, а также ввиду повышенной отдачи теплоты стенкам камеры сгорания (из-за высоких температур в детонационной волне и срыва пограничного слоя с поверхности стенок) имеет место ухудшение экономичности двигателя. Дополнительно можно отметить возможность вызванных ударными волнами местного перегрева элементов камеры сгорания и механического удаления масляной плёнки с поверхностей. Это приводит к повышенному износу деталей и соответствующему снижению ресурса двигателя.

Даже если за счёт выбора сниженной степени сжатия удаётся избежать детонации при работе двигателя на газе, максимальное давление цикла и жёсткость сгорания получаются выше, чем при работе на дизельном топливе. Это подтверждается результатами индицирования рабочих процессов дизеля и газодизеля, представленных на рис. 2 [4]. Эксперименты выполнены на двигателе 4Ч 11/12,5 при частоте вращения вала 2020 мин<sup>-1</sup> и среднем эффективном давлении 0,63 МПа. В обоих случаях степень сжатия и геометрический угол опережения подачи топлива, определяемый по началу подачи топливным насосом высокого давления (26° поворота коленчатого вала до верхней мёртвой точки поршня), оставались неизменными. На рисунке сплошной линией показана индикаторная диаграмма дизельного цикла, штриховой – газодизельного цикла. Отметим также значительное увеличение длительности задержки воспламенения  $\varphi_{в}$  (относительно начала топливоподдачи насосом) при переходе от дизельного цикла к газодизельному. Это можно объяснить тем, что концентрация кислорода в период впрыскивания жидкого топлива в газодизельном цикле меньше, чем в дизельном цикле, и поэтому скорость предпламенных реакций ниже. Тем не менее, увеличенный период задержки воспламенения способствует увеличению массы горючей смеси, подготовленной к быстрому окислению (горению), а это, в свою очередь, наряду с детонационным характером распространения

пламени также способствует росту жёсткости сгорания и максимума давления цикла  $p_z$ .

Другая острая проблема, возникающая при реализации рабочего цикла ДД, состоит в том, что в случае подачи топливного газа во впускной патрубке двигателя (перед впускными клапанами) в период так называемого перекрытия клапанов (когда открыты и впускные, и выпускные клапаны) происходит потеря газа в выпускной коллектор. Разумеется, наличие перекрытия клапанов – не единственная причина неполного использования и выброса газа: потере газа способствует и наличие «мёртвых» зон в камере сгорания, и эффект «гашения факела» вблизи стенок камеры. Но наиболее существенную роль в описываемом нежелательном процессе играет перекрытие клапанов.

Рассматриваемую проблему необходимо решить не только потому, что потеря газа снижает КПД двигателя. Природный газ, как известно, состоит преимущественно из метана  $CH_4$ , который в условиях атмосферы обладает парниковым эффектом в двадцать раз более сильным, чем двуокись углерода [5]. Поэтому выбросы несгоревшего метана должны быть сведены к минимуму. Иначе работа двигателя в режиме газодизеля по создаваемому парниковому эффекту может превзойти работу в режиме дизеля.

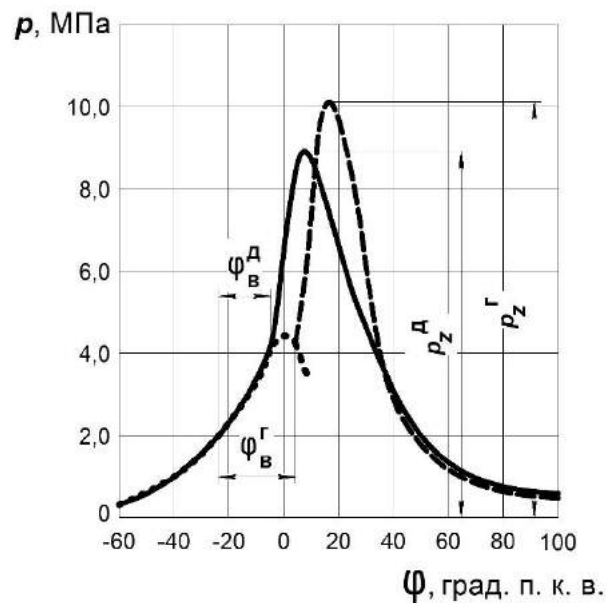


Рис. 2. Индикаторные диаграммы дизельного и газодизельного циклов

Разумеется, в развитии и применении ДД в настоящее время наряду с описанными выше существуют и другие в должной мере нерешённые проблемы. Например, до сих пор не вполне ясен вопрос о выборе агрегатного состояния газа, используемого для питания транспортных двигателей. В организации высокоэффективного рабочего процесса ДД также не решены большое число вопросов научно-технического характера [5]. Однако, описанные выше две проблемы, на наш взгляд, носят приоритетный характер.

## 2. Возможные направления решения проблем

Ответим на вопрос о том, как можно обеспечить высокий КПД двухтопливного двигателя при одновременном исключении детонации в процессе горения?

Известны компромиссные решения, при которых степень сжатия в ДД выбирают несколько ниже обычной для дизеля и несколько выше, чем в газовом двигателе. В подобном случае при работе в режиме газодизеля для уменьшения возможности возникновения детонации целесообразно сместить момент воспламенения топливовоздушной смеси в сторону процесса расширения рабочего тела. Это достигается более поздним началом подачи «пилотного» дизельного топлива по сравнению с началом подачи основного топлива в режиме дизеля. Однако описываемое решение не позволяет рассчитывать на получение высокого КПД двигателя. Отмечается также ограниченность возможности форсирования двигателя по среднему эффективному давлению [5]. На наш взгляд, указанное компромиссное решение вряд ли целесообразно использовать на практике.

Другой возможный способ защиты от детонации в ДД – управление составом газожидкостной топливной смеси в режиме газодизеля [6]. Это средство, на наш взгляд, обладает неоправданной сложностью в осуществлении. К тому же возможное наличие в топливной смеси значительной доли жидкого топлива может существенно нивелировать положительный эффект от присутствия газа в смеси.

Мы предлагаем рассмотреть возможность решения проблемы организации высокоэффективного рабочего процесса ДД посредством управления степенью сжатия. Рассмотрим варианты реализации этого принципа.

Необходимо разработать систему (устройство), обеспечивающую возможность оперативного изменения степени сжатия при переходе с одного вида топлива на другой. Важнейшим требованием, которое следует предъявить к устройству изменения степени сжатия, является его надёжность. Анализ показал, что все рассмотренные нами известные устройства довольно сложны: они представляют собой, как правило, видоизменение основного механизма двигателя – кривошипно-шатунного механизма [2]. Эти устройства, по всей видимости, не обладают необходимым уровнем надёжности, по этой причине их вряд ли следует использовать в ДДТ.

Отметим, что в известных устройствах предусмотрено изменение геометрической степени сжатия. Нами предложено принципиально иное решение – изменение не геометрической, а действительной степени сжатия. Осуществляется это решение за счёт перехода на более позднее закрытие впускных клапанов на такте сжатия заряда цилиндра при переводе двигателя с дизельного цикла на газодизельный. Происходит так называемое «укороченное сжатие», как в известном цикле Миллера [7].

Рассмотрим предложенное решение более подробно. При позднем закрытии впускных клапанов к началу фактического сжатия в цилиндре остаётся уменьшенная масса воздуха, ввиду его

«выталкивания» поршнем до момента закрытия впускных клапанов. В условиях поддержания неизменного коэффициента избытка воздуха для сгорания это приводит к снижению мощности двигателя. При реализации цикла Миллера отмеченную потерю воздушного заряда компенсируют увеличением давления наддува. В рассматриваемом нами случае потеря мощности в режиме газодизеля ожидается не столь значительной, по крайней мере, по двум причинам. Во-первых, потеря мощности в некоторой степени может быть компенсирована повышенной эффективностью цикла за счёт увеличенного отношения степеней расширения рабочего тела в цилиндре к степени его сжатия. Во-вторых, процесс горения в условиях гомогенной топливовоздушной (газовоздушной) смеси можно осуществлять при сниженном коэффициенте избытка воздуха, следовательно, при уменьшенной массе воздушного заряда. Каков уровень мощности двигателя может быть получен в режиме газодизеля зависит от уровня температуры отработавших газов, который может быть допущен, исходя из условия обеспечения приемлемой тепловой напряжённости деталей двигателя.

Предложенное нами решение об изменении степени сжатия при переходе от режима дизеля к режиму газодизеля, осуществляемое изменением угла закрытия впускных клапанов, по сути представляет собой управление так называемыми фазами газораспределения в двигателе. При реализации этого решения попутно может быть решена и вторая рассмотренная выше проблема – уменьшен угол перекрытия клапанов. Напомним, что это позволит сократить потерю газа из цилиндра в фазе продувки камеры сгорания и улучшить за счёт этого топливную экономичность двигателя.

Итак, рассматриваемые в статье проблемы могут быть решены посредством изменения фаз газораспределения в ДД при переводе двигателя на другой вид топлива.

## 3. Техническое решение проблем

Нами рассмотрены два принципиально различных направления реализации устройств для изменения фаз газораспределения в ДД.

Первое направление заключается в применении системы электрогидравлического [8] или электромагнитного [9] привода клапанов, которые содержат индивидуальные (для каждого клапана) либо гидравлические силовые цилиндры, либо электромагниты. С помощью подобной системы можно изменять моменты времени открытия и закрытия, а также высоту подъёма каждого клапана, в зависимости от режима работы двигателя. Применение указанных систем даёт ряд других преимуществ. Например, в системе электромагнитного привода можно отключать часть цилиндров двигателя. В этом случае оставшаяся в работе часть используется более эффективно [9]. При всей привлекательности отмеченных свойств электрогидравлические и электромагнитные системы не для всех объектов транспортной техники и не во всех случаях обладают достаточной надёжностью. Кроме того, для их работы требуются повышенные затраты энергии. Например, по сравнению с обычным приводом клапанов потребная

мощность при электромеханическом приводе может быть повышена на 80% [9].

Предлагаемое нами второе направление управления фазами газораспределения в ДД заключается в использовании системы, аналогичной традиционной системе реверсирования двигателя, в которой вал газораспределительного механизма снабжён двумя комплектами кулаков: один комплект предназначен для привода клапанов на «переднем ходе», другой – на «заднем ходе».

Упомянутую систему реверсирования реализуют в одном из двух вариантов. При выполнении операции реверсирования по первому варианту после остановки двигателя работающего, например, на «передний ход», толкатели клапанного механизма сначала поднимают над кулаками привода клапанов, смещают распределительный вал вдоль его оси, подставив под толкатели кулаки «заднего хода», и опускают толкатели на указанные кулаки. Затем пускают двигатель на «задний ход». Во втором варианте, в отличие от первого, процедуры поднятия и опускания толкателей исключены: при выполнении операции реверсирования в клапанном механизме осуществляется только одно движение – перемещение распределительного вала вдоль его оси. При этом толкатели перемещаются с одного комплекта кулаков на другой по сложной переходной поверхности. Фрагмент такого распределительного вала показан на рис. 3.



*Рис. 3. Фрагмент газораспределительного механизма двигателя с реверсированием вращения путём*

*осевого перемещения распределительного вала:*

*1 – кулак «переднего хода»; 2 – кулак «заднего хода»; 3 – переходная поверхность*

Форма и размеры толкателей, а также указанной переходной поверхности, должны исключить чрезмерные контактные напряжения во взаимодействующих элементах механизма.

Предложенная система управления фазами газораспределения в двигателе двойного топлива, обеспечивающая возможность изменения фаз при смене вида топлива, по сравнению с альтернативными системами обладает следующими основными преимуществами: во-первых, она – исключительно механического типа, что обеспечивает её высокую надёжность, во-вторых, по конструкции она идентична широко известной, освоенной в эксплуатации системе реверсирования

коленчатого вала. Последнее обстоятельство позволяет рассчитывать на скорейшее внедрение нашего предложения в практику создания двухтопливных двигателей и обеспечение высокого качества их рабочего процесса.

### **Заключение**

Современное развитие транспортной энергетики характеризуется расширением использования природного газа в качестве топлива. Газовое топливо обладает многими важными преимуществами, в числе которых относительно малая стоимость и благоприятный состав отработавших газов. Вместе с тем, ему присущи серьёзные недостатки. В частности, по сравнению с дизельными газовые двигатели не обеспечивают достаточно высокого КПД рабочего цикла, так как во избежание детонации в них назначают невысокую степень сжатия рабочего тела. Кроме того, неразвитость современной инфраструктуры снабжения газом значительно затрудняет его использование на транспорте.

Объединить преимущества обоих видов топлива позволяет использование так называемых двухтопливных двигателей, которые могут работать либо на жидком топливе (в режиме дизеля), либо на газе при осуществлении самовоспламенения малой порции запального дизельного топлива (в режиме газодизеля).

В числе важнейших научно-технических задач, которые необходимо решить для получения высокоэффективного рабочего процесса двухтопливного двигателя – разработка средства оперативного изменения степени сжатия при смене вида топлива. Важно также решить вопрос об уменьшении потери газа, которая происходит в период перекрытия клапанов при работе двигателя в режиме газодизеля.

Известные устройства для изменения степени сжатия, которые на протяжении почти двух последних десятилетий применяются некоторыми фирмами, производящими автомобильные двигатели, весьма сложны по конструкции и, по нашему мнению, недостаточно надёжны.

Мы предложили изменять не геометрическую степень сжатия, как это осуществляется в известных устройствах, а действительную. Суть решения состоит в изменении угла запаздывания закрытия впускных клапанов относительно нижней мёртвой точки поршня. Так при переводе двигателя с дизельного цикла на газодизельный происходит переход на более позднее закрытие впускных клапанов на такте сжатия заряда цилиндра, что и обеспечивает уменьшение действительной степени сжатия.

Предложенное решение, которое по сути представляет собой изменение фаз газораспределения, позволяет попутно решить и вторую задачу – при переводе двигателя с дизельного цикла на газодизельный уменьшить угол перекрытия клапанов и сократить, таким образом, потерю газа.

Возможны варианты реализации предложенного решения. Для управления фазами газораспределения могут быть использованы системы электрогидравлического или электромагнитного привода клапанов. Однако эти



системы недостаточно надёжны, и для их работы требуются повышенные затраты энергии.

Целесообразно использовать механическую систему, аналогичную традиционной системе реверсирования двигателя, в которой вал газораспределительного механизма снабжён двумя комплектами кулаков, обеспечивающих два различных сочетания фаз газораспределения. Один комплект используется при работе двигателя в режиме дизеля, другой – в режиме газодизеля.

Внедрение предложенного решения в практику создания двухтопливных двигателей обеспечит рациональную организацию рабочего процесса двигателя с учётом особенностей процессов подачи топлива и его горения при питании двигателя жидким или газовым топливом. В итоге реализация решения будет способствовать получению высоких технико-экономических и экологических показателей двигателей.

#### Литература

1. Двигатели на метане [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cngas.ru/produkty/nabory-dlya-konversii-benzinovyh-i-izelnyh-dvigatelej/> (дата обращения: 05.01.2018) – 10 р.
2. Гаврилов В.В. Организация рабочего процесса в судовом поршневом двигателе двойного топлива / В.В. Гаврилов, Д.Д. Богачёв / Материалы Второго Всероссийского науч.-техн. форума «Корабельная энергетика: из прошлого в будущее» 12–16 февраля 2018 г. // СПб: Изд-во СПбГМТУ. – 2018. – С. 123–128.
3. Сафонов А.С. Химмотология горюче-смазочных материалов / А.С. Сафонов, А.И. Ушаков, В.В. Гришин // СПб.: НПИКЦ. – 2007. – 488 с.
4. Лопатин О.П. Индексирование рабочего процесса газодизеля при работе с рециркуляцией / О.П. Лопатин // Молодой ученый. – 2015. – №13. – С. 144-147.
5. Мельник Г.В. Развитие двигателестроения за рубежом (по материалам конгресса CIMAC) // Двигателестроение. – 2013. – №13. – С. 39 – 53.
6. Береснев М.А. Особенности контроля детонации при использовании бинарного топлива / М.А. Береснев, А.Л. Береснев / Материалы междунар. науч. практ. конф. "Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте – 2011" // Одесса: Черноморье. – 2011. – Т. 1. – С. 56–58.
7. Белоусов Е.В. Цикл Миллера и его реализация в судовых дизельных двигателях / Е.В. Белоусов, В.В.Чернявский // Двигатели внутреннего сгорания. – 2013. – № 1. – С. 127 – 132.
8. Гидравлический привод клапанов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cngas.ru/produkty/nabory-dlya-konversii-benzinovyh-i-izelnyh-dvigatelej/> (дата обращения: 30.04.2018) – 11 р.
9. Электромагнитный привод клапанов [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://ustroistvo-avtomobilya.ru/dvigatele/e-lektromagnitny-j-privod-klapanov/> (дата обращения: 30.04.2018) – 12 р.

#### References

1. Dvigateli na metane. [Methane-powered engines]. Web. 5 Jan. 2018 <[cngas.ru/produkty/nabory-dlya-konversii-benzinovyh-i-izelnyh-dvigatelej](http://cngas.ru/produkty/nabory-dlya-konversii-benzinovyh-i-izelnyh-dvigatelej/)> (In Russian)
2. Gavrilov V.V., Bogachev D.D. Organizaciya rabocheho processa v sudovom porshnevom dvigatele dvojnogo topliva [Organization of the working process in marine reciprocating engine dual-fuel]. Materialy Vtorogo Vserossijskogo nauch.-tekhn. foruma «Korabel'naya ehnergetika: iz proshlogo v budushchee, 12–16 fevralya 2018 g». Saint-Petersburg. SPbGMTU, 2018. pp. 123–128. (In Russian)
3. Safonov A.S., Ushakov A.I., Grishin V.V. Himmotologiya goryuche-smazochnyh materialov [Chemistry of fuels and lubricants]. Saint-Petersburg. NPIKC, 2007. 488 p. (In Russian)
4. Lopatin O.P. Indicirovanie rabocheho processa gazodizelya pri rabote s recirkulyaciej [Indexing workflow gas diesel engine with recycling]. Molodoy uchyonyj. 2015, N13, pp. 144-147. (In Russian)
5. Mel'nik G.V. Razvitie dvigatelestroeniya za rubezhom (po materialam kongressa CIMAC) [Development of engine building abroad (according to the materials of the Congress CIMAC)]. Dvigatelistroenie, 2013, N13, pp. 39 – 53. (In Russian)
6. Beresnev M.A., Beresnev A.L. Osobennosti kontrolya detonacii pri ispol'zovanii binarnogo topliva [Features of detonation control when using binary fuel]. Materialy mezhdunar. nauch. prakt. konf. "Perspektivnye innovacii v nauke, obrazovanii, proizvodstve i transporte, 2011". Odessa. Chernomor'e, 2011, Vol. 1, pp. 56–58. (In Russian)
7. Belousov E.V., Chernyavskij V.V. Cikel Millera i ego realizaciya v sudovyh dizel'nyh dvigatelyah [Miller cycle and its implementation in marine diesel engines]. Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Internal combustion engine]. 2013, N 1, pp. 127 – 132. (In Russian)
8. Gidravlicheskiy privod klapanov [Hydraulic valve actuator]. Web. 30 Apr. 2018 <[http://cngas.ru/produkty/nabory-dlya-konversii-benzinovyh-i-izelnyh-dvigatelej](http://cngas.ru/produkty/nabory-dlya-konversii-benzinovyh-i-izelnyh-dvigatelej/)> (In Russian)
9. EHlektromagnitnyj privod klapanov [Solenoid valve actuator]. Web. 30 Apr. 2018 <[http://ustroistvo-avtomobilya.ru/dvigatele/e-lektromagnitny-j-privod-klapanov](http://ustroistvo-avtomobilya.ru/dvigatele/e-lektromagnitny-j-privod-klapanov/)> (In Russian)



УДК 629.12.001.2

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВИБРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЩЕЙ СИСТЕМЫ АМОРТИЗАЦИИ ДИЗЕЛЯ 2Ч 8,5/11 С ГИДРОТОРМОЗОМ, СМОНТИРОВАННЫЕ НА ОБЩЕЙ - НЕСУЩЕЙ РАМЕ С ТОРООБРАЗНЫМИ КАНАТНЫМИ ВИБРОИЗОЛЯТОРАМИ**

**Минасян Минас Арменакович**

доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
e-mail: mamsar@mail.ru

**Аунг Мьо Тхант**

аспирант  
кафедра судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
e-mail: tinkokotun999@gmail.com

**Минасян Армен Минасович**

кандидат технических наук  
доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
198262, Санкт-Петербург, ул. Ленинский, 101  
e-mail: mamsar@mail.ru

### **Аннотация**

В работе отмечается, что по структуре стальной канат является одним из наиболее подходящих материалов, используемых в качестве жаростойкого упругого элемента виброизолирующих конструкций и креплений (виброизоляторов).

Для решения проблем виброизоляции судовых дизельных энергетических установок в рамках развития и усовершенствования системы амортизации представлен оригинальный запатентованный торообразный канатный виброизолятор.

Оценка вибрационной эффективности упомянутого виброизолятора проведена экспериментальными исследованиями в составе общей системы амортизации дизеля 2Ч 8,5/11 с гидротормозом, смонтированные на несущей раме.

При невозможности решения проблем вибрации в технике известными серийными резинометаллическими виброизоляторами, авторы предлагают применение виброизоляторов с упругим элементом из стального каната, например торообразной формы. Вибрационная эффективность последних подтверждается экспериментально.

Для усовершенствования и развития подобных конструкций виброизоляторов в качестве не только опорных, но и неопорных связей создается специальный универсальный стенд на базе дизель-генераторного агрегата с дизелем 2Ч 8,5/11.

**Ключевые слова:** виброизоляторы, торообразные канатные виброизоляторы, упругие связи, виброизолирующие конструкции, виброизолирующие крепления, вибрационная эффективность, виброперепад, система амортизации.

## **EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE VIBRATION EFFICIENCY OF THE COMMON SHOCK-ABSORPTION SYSTEM OF DIESEL 2CH 8.5 / 11, WITH A HYDRAULIC BRAKE, MOUNTED ON A COMMON - BEARING FRAME WITH TOROID-SHAPE ROPE VIBRATION ISOLATORS**

**Minas A. Minasyan**

Dr.Sci.Tech, professor  
Professor, Department of Marine Internal Combustion Engines and Diesel Plants  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: mamsar@mail.ru

**Aung Myo Thant**

post-graduate student  
Department of Marine Internal Combustion Engines and Diesel Plants  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: tinkokotun999@gmail.com

**Armen M. Minasyan**

PhD in Engineering Science  
Associate Professor of Computer Engineering and Information Technology  
St. Petersburg State Marine Technical University  
198262, St. Petersburg, Leninsky, 101  
e-mail: mamsar@mail.ru

**Abstract**

It is noted in the study that a steel cable by the structure is one of the most suitable materials used as a fire-resistant elastic element of vibration-insulating structures and absorbers (vibration insulators).

To solve the problems of vibration isolation of ship diesel power plants, as part of the development and improvement of the shock-absorbing system, the original patented toroidal cable vibration absorber is presented.

Evaluation of the vibration efficiency of the above mentioned vibration insulator was carried out by experimental studies as part of a common shock-absorbing system for 2 Ch 8.5 / 11 diesel engine with a hydraulic brake mounted on a bearing frame.

When it is impossible to solve the problems of vibration in the machinery with known serial rubber-metal vibration isolators, the authors propose the use of vibration isolators with an elastic element made of steel rope, for example, with a toroid-shaped. Vibration efficiency of the latter is confirmed experimentally.

To improve and develop such vibration insulator engineering designs, a special universal bench is designed, based on a diesel generator set with 2Ch 8.5 / 11 diesel, for not only supporting, but also non-supporting ties .

**Keywords:** vibration isolators, toroid-shaped rope vibration isolators, elastic ties, vibration-proof structures, vibration-proof absorbers, vibration efficiency, vibration differential, shock-absorbing system.

**Введение**

Статья посвящена экспериментальной оценке вибрационной эффективности оригинальных торообразных канатных виброизоляторов (ТКВ) в качестве упругих опор общей системы амортизации дизеля 2Ч 8,5/11 с гидротормозом. Обзор научно-технической, патентной литературы и других источников информации, анализ и сопоставление свойств виброизоляторов, изготовленных с применением различных упругих элементов, и сравнение эксплуатационно-технологических качеств показали, что по структуре стальной канат является одним из наиболее подходящих материалов, используемых в качестве пожаростойкого упругого элемента [1, 2].

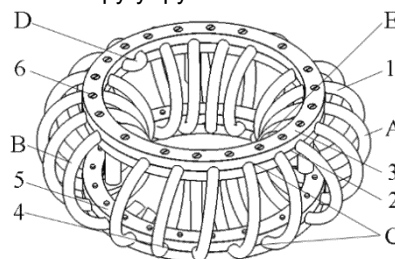
**1. Актуальность проблемы**

Существенным недостатком известных ТКВ [3] являются недостаточная вертикальная устойчивость под действием силы тяжести амортизированного объекта (верхний опорный элемент виброизолятора сдвигается в сторону – нарушается его симметричность относительно нижнего опорного элемента). Кроме того, небольшой зазор между внутренними смежными полувитками ограничивает свободный ход опоры. То есть при незначительной осевой деформации витки сжимаются, превращаясь из круглой формы в форму эллипса. При этом зазор между внутренними смежными полувитками исчезает и происходит касание полувитков друг с другом. Упор смежных полувитков таким образом препятствует свободному ходу верхней подвижной планки, пропуская удар к фундаменту (или наоборот, если удар передается от судового фундамента). Такая склонность к деформации сдвига и ограниченность свободного хода снижает вибрационную эффективность, его надежность и срок службы опоры.

Техническим результатом полезной модели [4] является достижение высокой вибрационной эффективности и надежности виброизолирующих

опор, следовательно, и срока службы дизельной энергетической установки (ДЭУ).

ТКВ содержит торообразный упругий элемент 1 (рис. 1), выполненный из двух «А» и «В» частей стального каната, навитого по спирали, опорные элементы 2–5 в виде дисков-колец, выполненных составными или неразъемными с пазами-отверстиями «С», в которых размещены и зафиксированы витки троса. Каждая часть «А» и «В» упругого элемента 1 в середине изогнута с образованием петли «D», «E». Одна половина каждой части стального каната от петель «D» и «E» навита по направлению часовой стрелки, а другая – против. При этом упругий торообразный элемент 1 образован из четырех противоположно направленных по кругу групп витков.



*Рис. 1. Общий вид торообразного канатного виброизолятора [4]*

Благодаря предложенной схеме ориентаций витков упругого элемента 1 относительно опорных элементов 2–5 и сокращению количества внутренних полувитков (рис. 3–5), то есть снижению уплотненности групп полувитков и возможности увеличения свободного хода, достигается достаточная устойчивость в горизонтальной плоскости и увеличение свободного хода опоры.

Симметричная несущая способность и величина свободного хода являются важными свойствами виброизолирующей опоры по обеспечению расчетной вибрационной эффективности, что

непосредственно связано с увеличением срока службы судовой дизельной энергетической установки.

Предлагаемая конструкция ТКВ [4] технологична в изготовлении и сборке, надежна и долговечна – срок службы 10 и более лет.

## 2. Экспериментальные исследования

Цель экспериментальных исследований – оценка вибрационной эффективности оригинального торообразного канатного виброизолятора в качестве упругой опоры амортизированного объекта.

Объект экспериментальных исследований - установка с двигателем 2Ч 8,5/11 и гидротормозом, смонтированные на общей – несущей раме с шестью ТКВ, которые нижними опорными фланцами в свою очередь закреплены на массивном фундаменте 7 (рис. 3, 4).

Аппаратура-мобильная система сбора и предварительной обработки экспериментальных данных LMS SCADAS Mobile [5] (рис. 2, 3).



Рис. 2. Мобильная система сбора и предварительной обработки экспериментальных данных LMS SCADAS: основной корпус мобильной системы; протативный компьютер; акселерометр PCB 333в32 и соединительный кабель

Место приведения экспериментальных исследований – лаборатория кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок СПбГМТУ.

Замеры проводились в соответствии с нормативно-технической документацией [6-8] для режима работы двигателя при 100% номинальной нагрузке и  $n = 1500$  об/мин.

Согласно ГОСТ 2436-80 [6], под эффективностью вибрационной защиты виброизолирующего крепления понимается отношение пикового или среднего квадратичного значения виброускорения (виброперемещения, виброскорости) или воздействующей на него силы до введения виброзащиты к значению той же величины после введения виброзащиты. Это отношение в ГОСТе названо коэффициентом эффективности вибрационной защиты или для краткости коэффициентом виброзащиты (или виброизоляции).

Поэтому экспериментальные исследования состоялись из двух этапов, первый при жестком креплении установки к фундаменту и второй – при упругом креплении. При жестком креплении замеры проводились на фундаменте, а при упругом – до (на болту виброизолятора) и после (на фундаменте) упругого крепления.

Общий вид амортизированной экспериментальной установки с дизелем 2Ч 8,5/11 и гидротормозом на общей несущей раме с измерительной аппаратурой представлен на рис. 3.

Мощность двигателя 8,8 кВт; частота вращения 1500 об/мин.

Массы (кг): дизеля – 220; маховика – 48,6; несущей рамы – 288; всей установки – 764,6.

Размеры ТКВ (мм): высота 69; наибольший диаметр 180; диаметр стального каната 9.

Точки замера вибрации при жестком (ЖК) и упругом (ТКВ) креплениях общей несущей рамы 3 экспериментальной установки к фундаменту 7 (рис. 3) обозначены на рис. 4.

На рис. 4 отдельно представлены также внешние виды жесткого (ЖК) и упругого (ТКВ) креплений, сверху на правом углу представлен фрагмент части несущей рамы 1 с ТКВ, ниже фрагмент несущей рамы с ТКВ с двумя акселерометрами PCB 333в32. Один акселерометр установлен на болту виброизолятора (точка ДоВ), а второй – на фундаменте (точка ФУ).

Перед замером двигатель был прогрет с выходом на режим работы 100% номинальной нагрузки при  $n = 1500$  об/мин. При работе под нагрузкой обеспечивалось постоянство температуры выпускных газов цилиндров, температуры воды и масла, давления масла, частоты вращения. Регистрация указанных параметров проводилась двумя комплектами средств, один комплект штатный на дизеле и второй дополнительный – современный 8 (рис. 3).

После достижения стабильной работы дизеля под нагрузкой по команде осуществлялся одновременный замер и регистрация уровней вибрации в дБ по ускорению до виброизоляторов (ДоВ), на фундаменте при упругом (ФУ) и жестком (ФЖ) креплениях.

Следует подчеркнуть важную особенность замеров, заключающуюся в том, что регистрация уровней вибрации осуществляется одновременно всех точек сразу, а сам замер занимает примерно 1-2 минуты. Кроме того, замеры повторили по три раза, которые практически не отличались друг от друга.

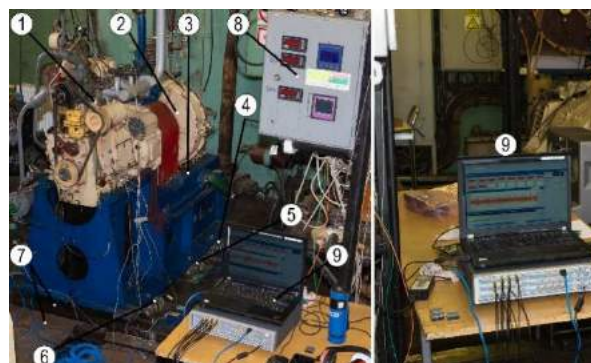


Рис. 3. Экспериментальная установка с дизелем 2Ч 8,5/11 и гидротормозом на общей несущей раме с опорными торообразными канатными виброизоляторами: 1 – дизель 2Ч 8,5/11; 2 – гидротормоз; 3 – общая несущая рама; 4, 5, 6 – опорные торообразные канатные виброизоляторы (6 шт); 7 – фундамент; 8 – щит контрольно-измерительных приборов; 9 – средства измерений и аппаратура (LMS Scadas Mobile, акселерометр PCB 333в32, микрофон BSWA MPA231, калибровочный вибратор)

После обработки замеров по точкам соответствующие результаты представлены в табл. 1.

По значениям уровней вибрации двух вариантов крепления объекта к фундаменту (табл. 1, столбцы № 2, 3 и 4) определены перепад вибрации или виброперепад (ВП) и эффективность виброизоляции (ЭВ) табл. 1 [1, 6-8]

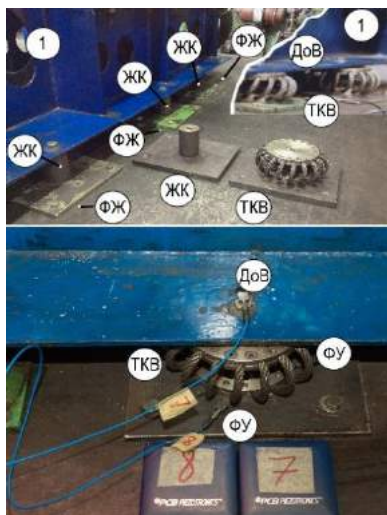


Рис. 4. Жесткое (ЖК) и упругое (ТКВ) крепление общей несущей рамы 1 экспериментальной установки (рис. 1) к фундаменту: ЖК – жесткое крепление;

ТКВ – торообразный канатный виброизолятор (упругое крепление); ДоВ – до ТКВ; ФЖ, ФУ – точки замера вибрации на фундаменте при жестком (ЖК) и упругом (ТКВ) креплениях.

Таблица 1

Уровни вибрации в дБ по ускорению при жестком (ФЖ) и упругом креплениях до (ДоВ) и после (ФУ) виброизоляторов, виброперепад (ВП) и эффективность виброизоляции (ЭВ)

Частота, Гц	Уровни вибрации в дБ по ускорению			ВП	ЭВ
	ФЖ	ДоВ	ФУ	ВП=ДоВ-ФУ= (3)-(4)	ЭВ=ФЖ-ФУ= (2)-(4)
1	2	3	4	5	6
2	78.6		32.1	46.5	
2.5	58.4	79.5	36.3	43.2	22.1
3.15	59.9	80.7	38.4	42.3	21.5
4	61.6	81.8	42.1	39.7	19.5
5	63.4	82.9	46.3	36.6	17.1
6.3	65.3	84.5	50.1	34.4	15.2
8	67.0	85.5	52.1	33.4	14.9
10	73.7	87.1	53.5	33.6	20.2
12.5	93.4	88.7	76.0	12.7	17.4
16	86.4	92.3	62.2	30.1	24.2
20	92.7	98.0	69.8	28.2	22.9
25	117.5	123.6	97.0	26.6	20.5
31.5	93.1	96.1	72.4	23.7	20.7
40	103.1	110.9	93.8	17.1	9.3
50	120.8	124.7	94.6	30.1	26.2
63	105.2	108.1	82.3	25.8	22.9
80	116.3	116.4	102.2	14.2	14.1
100	110.8	118.7	88.5	30.2	22.3
125	108.5	115.5	94.6	20.9	13.9
160	105.2	111.4	90.4	21.0	14.8
200	103.7	113.6	94.2	19.4	9.5
250	112.5	120.8	98.5	22.3	14.0
315	119.2	118.8	98.9	19.9	20.3
400	122.7	127.9	99.7	28.2	23.0
500	123.4	130.3	101.7	28.6	21.7
630	129.6	135.4	105.6	29.8	24.0
800	126.7	125.8	109.8	16.0	16.9

1000	130.9	127.4	110.8	16.6	20.1
1250	129.1	130.9	110.5	20.4	18.6
1600	121.7	125.5	109.9	15.6	11.8

Соответствующие спектры уровней вибрации в дБ по ускорению при упругом и жестком креплениях, виброперепада и виброизоляционной эффективности представлены на рис. 4.

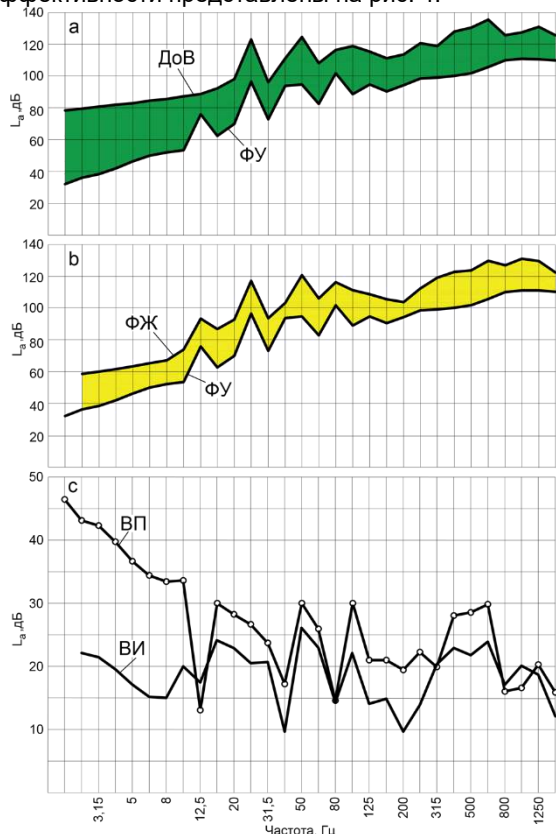


Рис. 5. Спектры уровней вибрации в дБ по ускорению при упругом и жестком креплениях,

виброперепада и виброизоляционной эффективности

**Заключение**

Виброизоляционная эффективность примерно от 10 до 27 дБ (рис. 4) по ускорению исследуемого оригинального торобразного канатного виброизолятора в достаточно широком диапазоне частот по сравнению с серийно выпускаемыми резинометаллическими виброизоляторами является хорошим результатом.

Похожая картина и по виброперепаду, однако последний подтвердил гипотезу недостаточной пригодности установки для вибрационных исследований. Это связано с недостаточной жесткостью несущей рамы и фундамента. Поэтому в настоящее время в рамках развития лабораторной базы создается специальный универсальный стенд в подвальном помещении с достаточно жестким основанием, где будут продолжены дальнейшие работы по развитию и усовершенствованию не только опорных виброизоляторов, но и неопорных конструкций и креплений (муфты, подвески, успокоители колебаний, вставки в трубопроводы и т. п.) в рамках обеспечения учебного процесса при подготовке бакалавров, магистров, инженеров и аспирантов.

**Литература**

1. Минасян М.А., Аунг Мьо Тхант, Минасян А.М. Стальные канатные упругие связи судовых дизельных энергетических установок и их элементов // Морские интеллектуальные технологии. 2018. Т.1. № 2. С. 85-93.
2. Минасян М.А., Аунг Мьо Тхант, Минасян А.М. Повышенная вибрация на рефрижераторных судах проекта В437/11 и технические предложения по её снижению // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия Морская техника и технология. 2018. № 3. С. 58-67.
3. Минасян М.А., Минасян А.М. Амортизация судовых дизельных энергетических установок: учеб. Пособие/ М.А.Минасян, А.М. Минасян. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2017. – 360 с.
4. Виброизолирующая опора судовой дизельной энергетической установки: пат. на пол. модель 156758 Рос. Федерация: МПК F16F 7/14 / авторы и заявители Минасян М.А., Минасян А.М., Аунг Мьо Тхант; патентообладатель ГОУ ВПО СПбГМТУ; опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32.
5. Учебно-исследовательский комплекс гибридного моделирования объектов морской техники профессионального уровня. Комплекс 1. Эксплуатационная документация. Фирма LMS International. 2009. 311 с.
6. ГОСТ ИСО 2954-97. Вибрация машин с возвратно-поступательным и вращательным движением. Требования к средствам измерений.
7. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII Механические установки. Раздел 9 Вибрация механизмов и оборудования. Технические нормы, 2017.
8. ISO 10816 – 6: 1995. Вибрация - Оценка состояния машин по результатам измерений вибрации на не вращающихся частях – Часть 6: Машины возвратно-поступательного действия номинальной мощностью свыше 100 кВт.

## References

1. Minasjan M.A., Aung M'o Thant, Minasjan A.M. Stal'nye kanatnye uprugie svjazi sudovyh dizel'nyh jenergeticheskikh ustanovok i ih jelementov // Morskie intellektual'nye tehnologii. 2018. T.1. № 2. S. 85-93.
2. Minasjan M.A., Aung M'o Thant, Minasjan A.M. Povyshennaja vibracija na refrizheratornyh sudah proekta V437/11 i tehnicheckie predlozhenija po ejo snizheniju // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehnicheckogo universiteta. Serija Morskaja tehnika i tehnologija. 2018. № 3. S. 58-67.
3. Minasjan M.A., Minasjan A.M. Amortizacija sudovyh dizel'nyh jenergeticheskikh ustanovok: uceb. Posobie/ M.A.Minasjan, A.M. Minasjan. – SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2017. – 360 s.
4. Vibroizolirujushhaja opora sudovoj dizel'noj jenergeticheskoj ustanovki: pat. na pol. model' 156758 Ros. Federacija: MPK F16F 7/14 / avtory i zajaviteli Minasjan M.A., Minasjan A.M., Aung M'o Thant; patentoobladatel' GOU VPO SPbGMTU; opubl. 20.11.2015, Bjul. № 32.
5. Uchebno-issledovatel'skij kompleks gibridnogo modelirovanija ob#ektov morskoy tehniki professional'nogo urovnja. Kompleks 1. Jekspluacionnaja dokumentacija. Firma LMS International. 2009. 311 s.
6. GOST ISO 2954-97. Vibracija mashin s vozvratno-postupatel'nymi i vrashhatel'nym dvizheniem. Trebovanija k sredstvam izmerenij.
7. Rossijskij morskoy registr sudohodstva. Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov. Chast' VII Mehanicheskie ustanovki. Razdel 9 Vibracija mehanizmov i oborudovanija. Tehnicheckie normy, 2017.
8. ISO 10816 – 6: 1995. Vibracija - Ocenka sostojanija mashin po rezul'tatam izmerenij vibracii na ne vrashhajushhihsja chastjah – Chast' 6: Mashiny vozvratno-postupatel'nogo dejstvija nominal'noj moshhnost'ju svyshe 100 kVt.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ, ОКЕАНА, АТМОСФЕРЫ И ИХ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ**

УДК 534.231

**ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ  
АКУСТИЧЕСКОЙ ДОБАВКИ К ТЕМПЕРАТУРЕ СРЕДЫ СО  
СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТЬЮ, ВЗВЕШЕННОЙ В ЖИДКОСТИ****Фёдор Фёдорович Легуша**

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: legusha@smtu.ru

**Мария Михайловна Олейник**

старший преподаватель кафедры физики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: astah.mar@yandex.ru

**Николай Михайлович Лисенков**

начальник лаборатории  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»  
196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44  
e-mail: colin.lisenkov@gmail.com

**Павел Васильевич Наливкин**

начальник Инженерного центра  
Машиностроительное предприятие «Винета»  
187026, Ленинградская обл., Тосненский район, г. Никольское, Ульяновское шоссе, 5Г  
e-mail: nalinkin@vineta.ru

**Виталий Юрьевич Чижов**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, главный специалист  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»  
196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44  
e-mail: G.v.chizhov@gmail.com

**Аннотация**

При распространении одномерной звуковой волны в свободной жидкой среде, кроме звукового давления  $p(x,t)$  и колебательной скорости  $u_1(x,t)$ , в ней возникает акустическая добавка к температуре среды  $T(x,t)$ . Если в жидкости находится неподвижная сферическая полость, имеющая малые волновые размеры  $k_1 R \ll 1$ , где  $k_1$  – волновое число среды,  $R$  – радиус сферы, то, за счёт взаимодействия основной звуковой волны с полостью, на её поверхности возникает однородное температурное поле с переменной амплитудой, изменяющейся по гармоническому закону  $T_{m'} \cdot e^{i\omega t}$ . Это происходит, когда внутри полости возникает неоднородная тепловая волна, имеющая сферическую форму фронта. Сильное затухание этой тепловой волны сопровождается диссипацией энергии основной звуковой волны. Кроме этого, при распространении тепловой волны в газе, заполняющем полость, за счёт выделения термоакустической энергии происходит излучение вторичной сферической звуковой волны, вызывающей появление там колебательного процесса.

**Ключевые слова:** звуковая волна, акустическая добавка к температуре среды, взаимодействие, сферическая полость, жидкость, газ, неоднородная тепловая волна, диссипация энергии, вторичная звуковая волна, двухфазная среда.

**PHYSICAL EFFECTS ARISING FROM THE INTERACTION OF AN ACOUSTIC  
COMPONENT TO THE TEMPERATURE OF A MEDIUM WITH A SPHERICAL  
ENCLOSURE SUSPENDED IN A LIQUID****Fedor F. Legusha**

Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor, Head of Physics Department of  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: legusha@smtu.ru



**Maria M. Oleinik**

Senior Lecturer of Physics Department of  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: astah.mar@yandex.ru

**Nikolai M. Lisenkov**

Head of laboratory  
FSUE "Krylov State Research Center"  
196158, St. Petersburg, Moskovskoye shosse, 44  
e-mail: colin.lisenkov@gmail.com

**Pavel V. Nalivkin**

Head of Engineering Center  
Machine-building enterprise "Vineta"  
187026, Leningrad Region, Tosnensky District, Nikolskoye, Ulyanovskoye shosse, 5G  
e-mail: nalivkin@vineta.ru

**Vitaliy Yu. Chizhov**

PhD in Engineering Science, Senior Researcher, Chief Specialist  
FSUE "Krylov State Research Center"  
196158, St. Petersburg, Moskovskoye shosse, 44  
e-mail: G.v.chizhov@gmail.com

**Abstract**

When a one-dimensional sound wave propagates in a free liquid medium, in addition to the sound pressure  $p(x, t)$  and the oscillatory velocity  $u_1(x, t)$ , an acoustic component to the medium temperature  $T'(x, t)$  arises in it. If there is a motionless spherical enclosure in the fluid, having small wave dimensions  $k_1 R \ll 1$ , where  $k_1$  is the wavenumber of the medium,  $R$  is the radius of the enclosure, then, due to the interaction of the main acoustic wave with the enclosure, a uniform temperature field with a variable amplitude, changing according to the harmonic law, appears on its surface  $T'_{m1} \cdot e^{i\omega t}$ . This occurs when a non-uniform heat wave arises inside the enclosure, which has a spherical shape of the front. The strong attenuation of this heat wave is accompanied by the dissipation of the energy of the main acoustic wave. In addition, during the propagation of a heat wave in the gas filling the enclosure, due to the release of thermo-acoustic energy, a secondary spherical acoustic wave is emitted, causing an oscillatory process to appear there.

**Keywords:** acoustic wave, acoustic component to medium temperature, interaction, spherical enclosure, liquid, gas, heterogeneous heat wave, energy dissipation, secondary acoustic wave, two-phase medium.

**Введение**

При распространении звуковых волн в море часто встречается ситуация, когда волна движется в двухфазной среде. Под двухфазной средой мы понимаем морскую воду, в которой взвешены газовые пузыри. Сферическая полость, рассматриваемая нами в данной работе, является физической моделью газового пузыря. Качество расчетов акустических параметров двухфазных сред в большой мере зависят от того, насколько подробно проведён анализ физических процессов, протекающих в пузыре при взаимодействии с ним звуковой волны. Классические подходы к расчёту параметров одиночных пузырей и двухфазных сред изложены, например, в работах [1-6]. Здесь только отметим, что все расчёты в данных работах приводились без учёта периодических изменений температуры, которые всегда наблюдаются в поле бегущей звуковой волны. Покажем, что теория акустического пограничного слоя (АПС) может быть применена для получения информации о физических процессах, протекающих в пузыре, при взаимодействии с ним звуковой волны. Для этой цели рассмотрим задачу о взаимодействии акустической добавки к температуре среды со сферической полостью, заполненной газом или паром умеренной плотности.

**1. Постановка задачи**

Пусть имеется бесконечное пространство, заполненное однородной жидкостью. В пространстве имеется неподвижная сферическая полость, имеющая радиус  $R$  (рис. 1). Внутренний объём полости заполнен газом. Термодинамические параметры газа известны и остаются постоянными во времени. В исходном состоянии полость находится в термодинамическом равновесии с жидкостью и, как следствие этого, тепло- и массообмена в окружающую среду через такую поверхность нет.

С поверхностью полости взаимодействует плоская бегущая гармоническая звуковая волна  $\vec{k}_1$ , уравнение движения которой для колебательной скорости имеет вид

$$u_1 = u_{m1} \cos(\omega t - k_1 x), \quad (1)$$

где  $\omega = 2\pi f$  - частота,  $k_1 = \omega / c_1$  - волновое число,  $c_1$  - адиабатическая скорость звука в жидкости.

Прежде чем решать задачу, введём дополнительные ограничения. Волновой размер полости  $k_1 R \ll 1$ . Следовательно, дифракция и отражение звуковой волны от поверхности полости

не наблюдаются. Кроме того, выполняется неравенство

$$R \gg \delta_{T2}, \quad (2)$$

где  $\delta_{T2}$  - толщина теплового пограничного слоя в газе. Неравенство (2) является условием формирования фронта сферической неоднородной тепловой волны, захлопывающейся по мере её движения к центру полости. В работах [7-9] показано, что при распространении звуковой волны (1) в жидкой среде одновременно с ней возникает волна, представляющая собой акустическую добавку к статической температуре среды

$$T_1' = T_{m1}' \cos(\omega t - k_1 x), \quad (3)$$

где  $T_{m1}'$  - амплитуда акустической добавки к статической температуре жидкости.

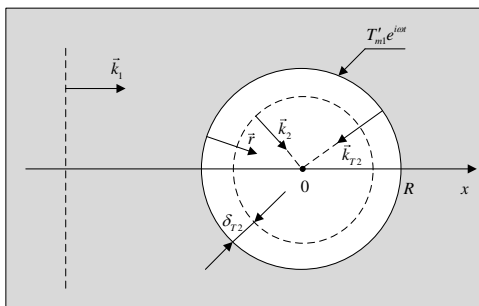


Рис. 1. Схема взаимодействия плоской гармонической звуковой волны  $\vec{k}_1$  со сферической полостью:

$\vec{k}_{T2}$  - неоднородная тепловая волна;  $\vec{k}_2$  - вторичная сферическая звуковая волна;  $\delta_{T2}$  - толщина теплового пограничного слоя в газе

Величина амплитуды  $T_{m1}'$  связана с амплитудой колебательной скорости звуковой волны  $u_{m1}$  формулой

$$T_{m1}' = \frac{\Gamma_1 - 1}{\beta_{V1}} \cdot \frac{u_{m1}}{c_1} \quad (4)$$

где  $\Gamma_1$  - нелинейный параметр жидкости,  $\beta_{V1}$  - коэффициент теплового объемного расширения жидкости.

## 2. Решение задачи

Рассмотрим результаты взаимодействия звуковой волны  $\vec{k}_1$  с поверхностью сферической полости (рис. 1). Ввиду того, что волновые размеры полости малы, на поверхности сферической полости, находящейся в поле звуковой волны (3), амплитуда акустической добавки к температуре изменяется по гармоническому закону  $T_{m1}' \cdot \exp(i\omega t)$ .

Непосредственно на поверхности жидкости, ограничивающей объём газа, должно выполняться термодинамическое граничное условие

$$T_{m1}' = T_{m2}', \quad (5)$$

где  $T_{m1}'$  - амплитуда акустической добавки к температуре в жидкости;  $T_{m2}'$  - амплитуда неоднородной тепловой волны в газе.

В соответствии с граничным условием (5) в газе на внутренней поверхности полости возникает неоднородная тепловая волна  $T_2'(r, t)$ . Уравнение движения захлопывающейся сферической тепловой волны имеет вид

$$T_2'(r, t) = T_{m1}' \cdot e^{i\omega t} \cdot \exp\left(-\frac{(1-i)(R-r)}{\delta_{T2}}\right), \quad (6)$$

где  $\delta_{T2} = \sqrt{2a_2/\omega}$  - толщина теплового пограничного слоя;  $a_2 = \chi_2/c_{P2} \rho_2$  - коэффициент температуропроводности газа,  $\chi_2$  - коэффициент теплопроводности;  $c_{P2}$  - удельная теплоемкость газа при постоянном давлении,  $T_{m1}' = T_{m2}'$ . Возбужденная в полости тепловая волна (6) может существовать только за счёт энергии, отбираемой у основной волны  $\vec{k}_1$ . Следовательно, при взаимодействии звуковой волны с поверхностью сферической полости наблюдается диссипативный процесс. Удельную мощность теплового потока, возникающего на поверхности сферы в результате возбуждения на ней тепловой волны, можно находим из закона Фурье

$$q = -\chi_2 \left( \frac{dT_2'(r, t)}{dr} \right)_{r=0}. \quad (7)$$

После подстановки в уравнение (7) выражения (6), опуская множитель  $e^{i\omega t}$ , после несложных преобразований имеем

$$q = \left(1 + \frac{\delta_{T2}}{R}\right) q_m, \quad (8)$$

где  $q_m = \sqrt{\chi_2 \beta_{V2} c_{P2}} \cdot \sqrt{\pi f} \cdot T_{m1}'$ .

В связи с тем, что в задаче выполняется условие (2) удельная мощность теплового потока  $q = q_m$ , а мощность, отбираемая у основной звуковой волны, равна

$$W = 4\pi R^2 q_m. \quad (9)$$

Если неравенство (2) выполняется, то процесс распространения звука в объёме полости описывается адиабатическим уравнением состояния. В тех случаях, когда условие (2) не выполняется, решение задачи усложняется. При  $R \leq \delta_{T2}$  процесс распространения звуковой волны в газе, заполняющем полость, становится изотермическим.

## 3. Возбуждение вторичной звуковой волны в газе, заполняющем полость

В исследуемом нами физическом процессе спрятан ещё один эффект, проявление которого заслуживает отдельного анализа. Появление в газе, заполняющем полость, неоднородной тепловой волны (6) из-за термоакустического эффекта [9] приводит к возникновению в нём вторичной сферической звуковой волны  $\bar{k}_2$  (рис. 1). Вторичная звуковая волна  $\bar{k}_2$  зарождается на поверхности сферы, радиус которой равен  $R - \delta_{T2}$ . Уравнение движения этой сферической звуковой волны имеет вид

$$u_{2r} = u_{m2} \frac{R - \delta_{T2}}{(R - \delta_{T2}) - r} \cdot e^{-\alpha_2 r} \cdot \cos(\omega t - k_2 r), \quad (10)$$

где  $\alpha_2$  - пространственный коэффициент затухания бегущей звуковой волны;  $k_2 = \omega/c_2$  - волновое число волны в газе,  $c_2$  - скорость звука в газе. Амплитуда колебательной скорости  $u_{m2}$  для волны (10) может быть рассчитана как [9]

$$u_{m2} = \sqrt{\pi f \cdot a_2} \cdot \beta_{V2} \cdot T'_{m1}, \quad (11)$$

где  $\beta_{V2}$  - коэффициент теплового объемного расширения газа, заполняющего полость.

По отношению к газу, поверхность жидкости, ограничивающей объем полости, можно считать акустически жёсткой. На этой поверхности должны выполняться граничные условия:  $u_{2r} = 0$  и  $p_2 \neq 0$ . Нетрудно показать, что в рассматриваемом нами случае амплитуда звукового давления на внутренней поверхности сферической полости с достаточной для практики точностью будет

$$p_{m2} \approx 2\rho_2 c_2 u_{m2}. \quad (12)$$

Отметим, что рассмотренный нами механизм возбуждения вторичной звуковой волны в объеме газа, заполняющего полость, отличен процессу генерации звуковых волн термофонами [10-11].

Из формулы (12) следует, что на поверхность полости должна действовать дополнительная переменная сила  $F_{m2} \cdot e^{i\omega t}$ , где  $F_{m2} = 4\pi R^2 p_{m2}$ , которая совместно с силой  $F_{m1} \cdot e^{i\omega t}$ , возникающей на поверхности полости в поле бегущей волны (1), приводит к возбуждению вынужденных колебаний полости. Если сферическую полость рассматривать как пузырь, то выражение для расчёта силы  $F_{m1}$  известно из [1-6] и имеет вид

$$F_{m1} = 6\gamma_2 P_0 R u_{m1} / f. \quad (13)$$

#### 4. Численная оценка полученных результатов

Для определённости предположим, что пространство (см. рис.1) заполнено водой. Полость – это пузырь, внутренний объем которого заполнен воздухом при статических значениях давления

$P_0 = 1,0$  атм и температуре  $T_0 = 293$  К. Интенсивность звуковой волны  $\bar{k}_1$  равна  $1,0$  Вт/м<sup>2</sup>; амплитуда колебательной скорости  $u_{m1} = 1,16$  мм/с; амплитуда акустической добавки к температуре  $T'_{m1} = 2,7 \cdot 10^{-2}$  К. Параметры пузыря: радиус  $R = 1,0$  мм; резонансная частота пульсационных колебаний  $f_0 = 3,26$  кГц. При принятых выше ограничениях выражения, представленные в этой работе, дают точные значения физических параметров в диапазоне от 0,5 кГц до 30 кГц.

На рис.2 показана частотная зависимость мощности, которая отбирается у основной волны  $\bar{k}_1$  и уходит на возбуждение тепловой волны (6), возбуждающейся на внутренней поверхности пузыря. Нетрудно заметить, что величина  $W$  растет с увеличением частоты пропорционально по  $\sqrt{f}$ .

Частотная зависимость амплитуды колебательной скорости вторичной звуковой волны  $\bar{k}_2$ , возникающей в газе за счёт термоакустического эффекта, представлена на рис.3. Из графика видим, что величина  $u_{m2}$  возрастает также пропорционально  $\sqrt{f}$ . Нетрудно заметить, что в представленном диапазоне частот выполняется неравенство  $u_{m1} \gg u_{m2}$ .

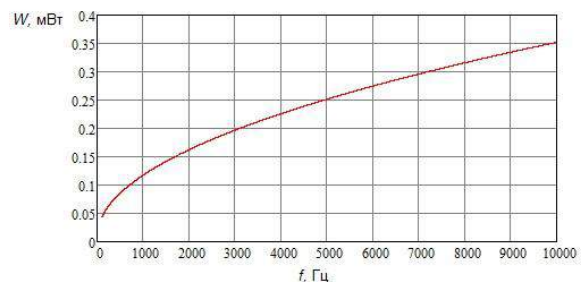


Рис. 2. Частотная зависимость мощности, рассеиваемой на поверхности пузыря, при возбуждении тепловой волны

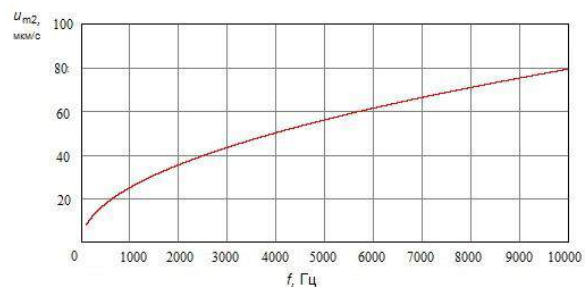


Рис. 3. Частотная зависимость амплитуды колебательной скорости  $u_{m2}$  во вторичной волне  $\bar{k}_2$

Амплитуда силы  $F_{m2}$ , действующей на поверхность пузыря в результате возбуждения в объеме воздуха сферической звуковой волны  $\bar{k}_2$ , растет пропорционально  $\sqrt{f}$ . Согласно выражению (13), амплитуда переменной силы  $F_{m1}$  убывает

пропорционально  $f^{-1}$ . Сопоставление частотных зависимостей для амплитуд  $F_{m1}$  и  $F_{m2}$  позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, для пузыря, имеющего радиус  $R = 1,0$  мм, на частотах  $f \leq 80$  кГц влиянием силы  $F_{m2}(f)$  можно пренебречь. Во-вторых, можно отметить, что кривые для  $F_{m1}(f)$  и  $F_{m2}(f)$  пересекутся на частоте 240 кГц, где  $F_{m1} = F_{m2}$ . На частотах  $f > 100$  кГц необходимо учитывать совместное действие сил  $F_{m1}$  и  $F_{m2}$  на пузырь.

### Заключение

Все выражения, полученные в данной работе, могут быть использованы для оценки диссипации акустической энергии на поверхностях пузырей, вмёрзших в лёд. В дальнейшем необходимо привести дополнительные исследования для случая, когда сферическая полость имеет большой волновой размер. Кроме того, заслуживает внимания задача о взаимодействии звуковых волн со сферой, имеющей малые волновые размеры, для которой выполняется условие  $\delta_{T2} \leq R$ .

### Литература

1. Foldy L.L., Carstener E.L. Propagation of sound through a liquid containing bubbles // JASA. – 1947, Vol. 19, pp. 481-501.
2. Devin Charles. Survey of thermal, radiation and viscous damping of pulsating air bubbles in water// JASA. – 1959, Vol. 31, No. 12, pp. 1654-1667.
3. Ильичев В.И., Корец В.Л., Мельников Н.П. Акустическое излучение одиночного неподвижного пузырька при периодических пульсациях // Акуст. Журн, 1993, т.39(1), с. 101-107.
4. Temkin S. Attenuation and dispersion of sound in dilute suspensions of spherical particles// JASA. – 2000, Vol. 108, No.1, pp. 126-146.
5. Буланов В.А. Введение в акустическую спектроскопию микронеоднородных жидкостей. Владивосток: Дальнаука, 2001, 203 с.
6. Kirchoff G. Ueber den Einfluss der Wärmeleitung in einem Gase auf die Schallbewegung Poggendorf's Annalen. 1868, Bd.134, No.6, s.166.
7. Константинов Б.П. О поглощении звуковых волн при отражении от твердой границы// ЖТФ. – 1939, т.9(3), с. 226-238.
8. Константинов Б.П. Гидродинамическое звукообразование и распространение звука в ограниченных средах. - Л.: Наука, 1974, 304 с.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Гидродинамика. Т.VI. - М.: Наука, 1988, 345 с.
10. Легуша Ф.Ф., Пугачёв С.И., Разрезова К.В., Старобинец И.М. Термоакустический эффект в жидкой среде. // Тр. XIV ВНПК «Прикл. технологии гидроакустики и гидрофизики». – Санкт-Петербург: Нестор-История, 2018, 450 с.
11. Невеселова К.В. Расчёт амплитуды переменной температуры активного элемента термофона// Морские интеллектуальные технологии.- Санкт-Петербург, 2014. - № 4 (26), т. 1, с. 110-115.

### References

1. Foldy, L.L., Carstener, E.L. Propagation of sound through a liquid containing bubbles. JASA. 1947, Vol. 19, pp. 481-501.
2. Devin Charles. Survey of thermal, radiation and viscous damping of pulsating air bubbles in water. JASA. 1959, Vol. 31, No. 12, pp. 1654-1667.
3. Il'ychev, V.I., Korez, V.L., Melnikov, N.P. Akusticheskoe izluchenie odinochnogo nepodvizhnogo puzyr'ka pri periodicheskikh pulsaziyah. Akust. Jurnal. 1993, Vol. 39, No.1, pp. 101-107.
4. Temkin, S. Attenuation and dispersion of sound in dilute suspensions of spherical particles// JASA. – 2000, Vol. 108, No.1, pp. 126-146.
5. Bulanov, V.A. Vvedenie v akusticheskuyu spektroskopiyu mikroneodnorodnyh zhidkostey. Vladivostok. Dalnauka. 2001. 203 p.
6. Kirchoff G. Ueber den Einfluss der Wärmeleitung in einem Gase auf die Schallbewegung Poggendorf's Annalen. 1868, Bd.134, No.6, s.166.
7. Konstantinov, B.P. O pogloschenii zvukovyh voln pri otrazhenii ot tverдой granizi. ZHTF. 1939, Vol. 9, No. 3, pp. 226-238.
8. Konstantinov, B.P. Gidrodinamicheskoe zvukoobrazovanie i rasprostraneni zvuka v ogranichennyh sredah. Leningrad. Nauka, 1974, 304 p.
9. Landau, L.D., Lifshiz, E.M. Teoreticheskaya fizika: Gidrodinamika. Vol. 4. Moscow. Nauka. 1988. 345 p.
10. Legusha F.F., Pugachev S.I., Razrezova K.V., Starobinec I.M. Thermoacoustic effect in the liquid medium. Saint-Petersburg. Nestor-History, 2018, 450 p.
11. Neveselova K.V. Calculation of time dependent temperature amplitude of the thermophone active element. Morskie intellektual'nye tehnologii. Saint-Petersburg. 2014. Vol.1, No 4 (26), pp. 110-115.

УДК 534.21

**КОЛЕБАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В БЕГУЩЕЙ ПЛОСКОЙ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЕ****Федор Федорович Легуша**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: legusha@smtu.ru

**Евгений Юрьевич Рытов**

кандидат технических наук, доцент кафедры физики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: physics\_spbmtu@mail.ru

**Александр Иванович Сетин**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой морских информационных систем и технологий  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: alset6103@rambler.ru

**Аннотация**

В работе рассматривается процесс колебаний температуры в бегущей звуковой волне, распространяющейся в однородной неограниченной сжимаемой вязкой теплопроводной среде. Получено выражение для расчета амплитуды  $T'_m$  акустической добавки к температуре среды. Проведен численный анализ формул, используемых для оценки значения  $T'_m$  в волне. Даны рекомендации по применению формул для расчета амплитуды  $T'_m$  в жидких средах и резиноподобных твердых телах. Полученные результаты позволяют уточнить параметры тепловых процессов, возникающих при взаимодействии бегущих звуковых волн с неоднородностями среды и границами сред. Это, в свою очередь, способствует повышению надежности теоретических оценок эффективности диссипативных процессов, возникающих при взаимодействии акустического поля с неоднородностями искусственного и естественного происхождения, находящимися в сплошной среде. При этом значительно расширяется круг задач физической и технической акустики, решение которых имеет большое практическое значение.

**Ключевые слова:** бегущая звуковая волна, звуковое давление, колебательная скорость, акустическая добавка к температуре среды, газ, жидкость, резиноподобное тело, диссипация энергии.

**TEMPERATURE VIBRATIONS IN A TRAVELING FLAT ACOUSTIC WAVE****Fedor F. Legusha**

Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor, Head of Physics Department of  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: legusha@smtu.ru

**Evgeny Yu. Rytov**

PhD in Engineering Science, Associate Professor at the Physics Department,  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: physics\_spbmtu@mail.ru

**Alexander I. Setin**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Head of the Department of Marine Information Systems and Technologies  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: alset6103@rambler.ru

**Abstract**

The paper addresses the process of temperature fluctuations in a traveling acoustic wave propagating in a homogeneous unbounded compressible viscous heat-conducting medium. An expression for calculating the amplitude  $T'_m$  of acoustic component to the medium temperature was obtained. The numerical analysis of the formulas used to estimate the value  $T'_m$  in the wave is carried out. Recommendations on the use of formulas for calculating the amplitude  $T'_m$  in liquid media and rubbery solids are given. The results obtained allow specifying the parameters of thermal processes arising from the interaction of traveling acoustic waves with medium inhomogeneities and medium boundaries. This, in turn, contributes to improving the reliability of theoretical estimates of the efficiency of dissipative processes arising from the interaction of the acoustic field with heterogeneities of artificial

and natural origin in a continuous medium. Thus, the range of problems of physical and technical acoustics is greatly expanded, the solution of which is of great practical importance.

**Keywords:** traveling acoustic wave, acoustic pressure, oscillatory velocity, acoustic additive to medium temperature, gas, liquid, rubbery solid, energy dissipation.

**Введение**

В случаях, когда звуковые волны распространяются в сжимаемых, вязких и теплопроводных средах, можно выделить следующие акустические параметры волны: звуковое давление, колебательную скорость частиц среды, акустическую добавку к температуре среды, акустическую добавку к плотности среды. Анализ современной акустической литературы показывает, что, в большинстве случаев, при проведении акустических исследований используются уравнения движения волн, описывающие изменения во времени и пространстве звукового давления или колебательной скорости.

Круг задач, рассматриваемых в физической и технической акустике, может быть значительно расширен, если при проведении исследований описание движения звуковой волны проводить с учетом изменений температуры среды в волне. Основной трудностью при этом остается отсутствие выражения, связывающего между собой, например, амплитуду акустической добавки к температуре среды и амплитуду колебательной скорости. Особенно большие трудности при этом возникают в процессе проведения расчетов в случаях, когда звуковые волны распространяются в жидкостях или резиноподобных твердых телах.

**1. Акустические параметры волны**

При распространении звуковых волн в безграничной вязкой теплопроводной среде акустические параметры среды могут быть записаны в виде соответствующих уравнений движения. В частности, для плоской бегущей одномерной звуковой волны, имеющей бесконечный фронт, акустические параметры среды могут быть записаны в виде:

- звуковое давление

$$p = p_m \exp(-\alpha x) \cos(\omega t - kx), \quad (1)$$

где  $p_m$  – амплитуда звукового давления,  $\alpha$  – пространственный коэффициент затухания волны,  $\omega = 2\pi f$  – частота,  $k = \omega/c$  – волновое число,  $c$  – скорость звука в среде;

- колебательная скорость

$$u = u_m \exp(-\alpha x) \sin(\omega t - kx), \quad (2)$$

где  $u_m = p_m/\rho c$  – амплитуда колебательной скорости,  $\rho$  – плотность среды;

- акустическая добавка к температуре среды

$$T' = T'_m \exp(-\alpha x) \sin(\omega t - kx), \quad (3)$$

где  $T'_m$  – амплитуда акустической добавки к температуре среды;

- акустическая добавка к плотности среды

$$p = p'_m \exp(-\alpha x) \sin(\omega t - kx), \quad (4)$$

где  $p'_m = \rho u_m/c = \rho M_a$  – амплитуда акустической добавки к плотности среды.

Отметим, что уравнение движения (4) практически не используется при проведении акустических расчетов. Кроме того, при распространении звуковой волны в ограниченных средах, если в рабочем диапазоне частот выполняется неравенство  $\alpha L \ll 0,5$ , где  $L$  – характерный размер ограниченного пространства, то диссипацией акустической энергии в объеме среды можно пренебречь. В этом случае величина коэффициента  $\exp(-\alpha x)$  близка к единице, и выражения (1) – (4) могут быть заменены уравнениями распространения незатухающих звуковых волн.

**2. Вывод формулы для расчета амплитуды акустической добавки к температуре среды**

Пусть в сжимаемой вязкой теплопроводной среде распространяется плоская бегущая звуковая волна. В волне, кроме звукового давления  $p$  и колебательной скорости  $u$ , также периодически изменяется температура  $T'$ . В термодинамике показано, что при адиабатических изменениях давления в газе  $P$  и изменениях абсолютной температуры среды  $T$  справедливо уравнение состояния Пуассона, которое в рассматриваемом случае можно записать в следующем виде

$$\frac{T + T'}{T} = \left( \frac{P + p}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad (5)$$

где  $\gamma = C_p/C_v$  – коэффициент Пуассона,  $C_p$ ,  $C_v$  – соответственно удельные теплоемкости при постоянном давлении и объеме среды.

В работах Г. Кирхгофа [1] и Б.П. Константинова [2] показано, что акустическая добавка к температуре среды (3) изменяется во времени и пространстве синхронно с колебательной скоростью (2). Воспользовавшись известной формулой  $p = \rho c u$ , выражение (5) запишем так

$$\frac{T + T'}{T} = \left( \frac{P + \rho c u}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}. \quad (6)$$

Акустические параметры, входящие в формулу (6), являются очень малыми физическими величинами. Это позволяет разложить правую часть выражения (6) в ряд по малым величинам  $\rho c u/P$ . После несложных преобразований имеем

$$1 + \frac{T'}{T} = \left( 1 + \frac{\rho c u}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 1 + \frac{\gamma-1}{\gamma} \cdot \frac{\rho c u}{P} + \dots$$

Сохранив в правой части этого разложения только второй член, получим формулу для расчета акустической добавки к температуре среды

$$T' = \frac{\gamma-1}{\gamma} \cdot \frac{\rho c u}{P} \cdot T. \quad (7)$$

Используя формулу Лапласа, которую запишем в следующем виде  $\gamma P = \rho c^2$ , после несложных преобразований из уравнения (7) получим выражение для расчета амплитуды акустической добавки к температуре среды

$$T'_m = (\gamma - 1) \frac{u_m}{c} T. \quad (8)$$

### 3. Анализ формул для расчета величины амплитуды акустической добавки к температуре среды

При распространении звуковой волны (3) изменения температуры приводят к локальным изменениям объема среды. Этот эффект можно учесть, если формулу (8) записать в следующем виде

$$T'_m = \frac{\gamma - 1}{\beta_v} \frac{u_m}{c} \frac{T}{273}, \quad (9)$$

где  $\beta_v$  – коэффициент теплового объемного расширения среды.

В литературе [3] приводится еще одна формула для расчета амплитуды акустической добавки к температуре среды

$$T'_m = \frac{\beta_v c T}{C_p} \cdot u_m. \quad (10)$$

Проведем численную оценку выражений (8), (9) и (10). При этом мы предположим, что в безграничной среде распространяется бегущая звуковая волна, имеющая интенсивность 1,0 Вт/м<sup>2</sup>. При проведении расчетов в жидких и резиноподобных средах в формулах (8) и (9) коэффициент Пуассона  $\gamma$  заменяем нелинейным параметром сред  $\Gamma$ . Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1

#### Значения акустической добавки к температуре среды

Среда	Номер формулы		
	(8)	(9)	(10)
Воздух	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$
Вода	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$
Керосин	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$9,3 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$
Полиамид 6	$9,6 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$8,1 \cdot 10^{-5}$

#### Литература

1. Kirchoff G. Ueber den Einfluss der Wärmeleitung in einem Gase auf die Schallbewegung, Poggendorf's Annalen der Physik und Chemie. 1868, Bd. 134, № 6, S. 177-193.
2. Константинов Б.П. Поглощение звуковых волн при отражении от твердой границы / ЖТФ. 1939. Т. 9 (3). С. 226-238.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. - М.: Наука, 1986.
4. Легуша Ф.Ф., Лисенков Н.М., Наливкин П.В., Олейник М.М., Чижов Г.В. Физические эффекты, возникающие при взаимодействии акустической добавки к температуре среды со сферической полостью, взвешенной в жидкости / МИТ 2018, № 4.
5. Легуша Ф.Ф., Лисенков Н.М., Наливкин П.В., Олейник М.М. Диссипация акустической энергии на сферической полости, взвешенной в жидкой среде / Тр. XIV ВНПК «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», СПб.: ЛЕМА, 2018, С. 545-548.
6. Легуша Ф.Ф., Ключина К.А., Никущенко Д.В., Рытов Е.Ю. Излучение вторичных звуковых волн поверхностью жидкости, контактирующей с газообразной средой / МИТ 2018, Т. 1, № 2 (40) С. 109-113.
7. Легуша Ф.Ф., Ключина К.А., Никущенко Д.В., Рытов Е.Ю. Механизм дополнительного излучения звуковых волн поверхностью жидкости, контактирующей с газообразной средой / Тр. XIV ВНПК «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», СПб.: ЛЕМА, 2018, С. 537-540.

Как видим из таблицы 1, для воздуха формулы (8), (9) и (10) дают практически одинаковые значения  $T'_m$ . Это верно, так как эти формулы получены в предположении, что среда, в которой распространяется звуковая волна, является газом.

Для жидкостей и резиноподобных твердых тел выражение (10) дает сильно заниженные значения  $T'_m$ . В этом случае формулу (10) применять нельзя. Это связано с тем, что при ее выводе [3] использовалась известное термодинамическое выражение для  $C_p - C_v$ . Напомним, что относительное изменение теплоемкости среды для газов  $(C_p - C_v)/C_p$  порядка  $10^{-1}$ , а для жидкостей и резиноподобных тел  $(C_p - C_v)/C_p < 10^{-2}$ .

Формулы (8) и (9) имеют эквивалентные физические обоснования. Это позволяет предположить, что значения  $T'_m$  для жидкости и резиноподобных тел находятся в промежутке между значениями, которые получаются в результате использования этих выражений.

#### Заключение

Установить, какая из формул (8) или (9) является точной, можно только экспериментальным путем. Прямые измерения значений  $T'_m$  провести невозможно. По этой причине, в дальнейшем необходимо теоретически обосновать и разработать методику косвенных измерений амплитуды акустической добавки к температуре среды.

Установление точных значений  $T'_m$  имеет большое практическое значение. Это позволит увеличить надежность теоретических оценок эффективности диссипативных процессов в средах, в которых имеются неоднородности различного происхождения. Например, в задачах взаимодействия звуковых волн с полостями, заполненными газом [4, 5], и при оценке интенсивности вторичных звуковых волн, излучаемых с поверхности жидкости, контактирующей с газом [6, 7].



## References

1. Kirchoff G. Ueber den Einfluss der Wärmeleitung in einem Gase auf die Schallbewegung, Poggendorf's Annalen der Physik und Chemie. 1868, Bd. 134, № 6, S. 177-193.
2. Konstantinov B.P. Absorption of sound waves reflected from a solid boundary / JTP. 1939. T. 9 (3) P. 226-238.
3. Landau L.D., Lifshits E.M. Theoretical physics. Tom VI. Gidrodinamika. M.: Nauka, 1986. 736 p.
4. Legusha F.F., Lisenkov N.M. Nalivkin V.P., Olejnik M.M., Chizhov, G.V. Physical effects, arising at the interaction of acoustic additive to the temperature of the medium with a spherical cavity, weighted in the liquid / MIT 2018.
5. Legusha F.F., Lisenkov N.M. Nalivkin V.P., Olejnik M.M. Dissipation of a acoustic energy on a spherical cavity weighted in a liquid medium / Proceedings of XIV VNPК "Applied technologies of hydroacoustics and Hydrophysics", St. Petersburg.: LEMA, 2018, P. 545-548.
6. Legusha F.F., Klyubina K.A., Nikushchenko D.V., Rytov E.Yu. The emission of secondary sound waves by the surface of a liquid contact with a gaseous environment / MIT 2018, T. 1, № 2 (40), P. 109-113.
7. Legusha F.F., Klyubina K.A., Nikushchenko D.V., Rytov E.Yu. Mechanism of additional radiation of sound waves by the surface of a liquid contact with a gaseous environment / Proceedings of XIV VNPК "Applied technologies of hydroacoustics and Hydrophysics", St. Petersburg.: LEMA, 2018, P. 537-540.

УДК 534.2:533

## ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ КАПЛИ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ЗВУКОВОМ ПОЛЕ

**Валерий Алексеевич Мурга**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

**Ксения Александровна Клубина**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: kklyubina@yahoo.com

### Аннотация

В рамках линейной акустики идеальной жидкости (газа) теоретически исследовано поведение жидкой капли или газового пузырька в поле плоской синусоидальной звуковой волны в отсутствие сил тяжести и с учетом поверхностного натяжения. В частности, исследуются деформационные (капиллярные) колебания поверхности капли (пузырька) и обусловленное ими рассеяние звука при частотах, близких к резонансным частотам для любой деформационной моды. Исследование проводится в предположении, что величины возможных деформаций капли или пузырька (то есть смещение любого элемента поверхности деформированной капли от её невозмущённой сферической поверхности) малы по сравнению с радиусом невозмущённой капли и с длиной капиллярных волн на поверхности капли. Приводятся формулы для потенциала рассеянного звука, ширины резонансной кривой, эффективного сечения рассеяния звука, резонансной амплитуды деформаций - для любой моды. Показано, что возможно интенсивное рассеяние звука, вызванное не только нулевой модой (сферические пульсации) колебаний поверхности газового пузырька (как обычно считается), но и другими, деформационными, модами, как пузырька, так и жидкой капли.

**Ключевые слова:** звуковая волна, пузырек, капля, поверхностное натяжение, деформационные моды, рассеяние звука, мощность излучения, резонанс.

## FORCED VIBRATIONS OF A COMPRESSIBLE LIQUID DROP IN AN ACOUSTIC FIELD

**Valery A. Murga**

PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Physics Department  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3

**Ksenia A. Klyubina**

PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Physics Department  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: kklyubina@yahoo.com

### Abstract

Within the framework of linear acoustics of an ideal liquid (gas), the behavior of a liquid drop or gas bubble in the field of a flat sinusoidal acoustic wave in the absence of gravity with taking into account surface tension was theoretically investigated. In particular, the deformation (capillary) oscillations of a drop (bubble) surface and the sound scattering caused by them are studied at frequencies close to the resonant frequencies for any deformation mode. The study is carried out under the assumption that the magnitudes of possible drop or bubble deformations (that is, the displacement of any element of the deformed drop surface from its unperturbed spherical surface) are small compared to the radius of the unperturbed drop and the length of capillary waves on the drop surface. The formulas for the potential of the scattered sound, the width of the resonance curve, the effective cross section for the scattering of sound, and the resonance amplitudes of deformations are given for any mode. It is shown that intense scattering of sound is possible, caused not only by the zero mode (spherical pulsations) of gas bubble surface oscillations (as it's commonly believed), but also by other, deformation modes of both the bubble and the liquid drop.

**Keywords:** acoustic wave, bubble, drop, surface tension, deformation modes, sound scattering, radiation power, resonance

Рассеяние звука на пузырьках (в воде), размер которых много меньше длины волны звука, представляет интерес прежде всего потому, что здесь возможно резонансное возбуждение нулевой моды колебаний поверхности пузырька

(сферические пульсации), приводящее к заметному рассеянию звука. Что касается других мод, связанных с изменением формы пузырька, то считается, что они не могут произвести заметного рассеяния [1], [2]. В подтверждение этой точки зрения

в [2] приведены численные оценки, из которых следует, что при одинаковых для различных мод амплитудах колебания поверхности пузырька мощность излучения звука нулевой модой подавляюще превосходит мощность излучения любой другой модой. Отсюда делается вывод, что при любом способе возбуждения колебаний пузырька только нулевая мода колебаний имеет значение как эффективный источник (генератор) звука

Но, как будет здесь показано, в случае вынужденных колебаний пузырька (и вообще капли любой жидкости) в поле плоской волны резонансные амплитуды колебаний различных мод существенно различаются, поэтому для вывода, сделанного в [2] (в предположении равенства этих амплитуд) нет оснований.

В существующих работах о рассеянии звука на отдельных пузырьках или их скоплениях поверхностное натяжение либо не учитывается, либо учитывается в предположении, что пузырьки сохраняют сферическую форму (см., например, [3]-[5]), поэтому из рассмотрения выпадает важный случай резонанса мод, связанных с изменением формы пузырька. Что касается взаимодействия жидких капель со звуковым полем, то обычно исследуется силовое, осредненное по периоду колебаний, воздействие интенсивного ультразвука на каплю (см. [6] и приведенную там литературу), вынужденные капиллярные (линейные) колебания, насколько известно, не рассматриваются. В предлагаемой здесь работе задача о вынужденных колебаниях капли (пузырька) в поле плоской звуковой волны решена в рамках классической акустики (то есть без учета диссипативных процессов, связанных с вязкостью и теплопроводностью сред).

Пусть сферическая (в отсутствие возмущения) капля взвешена в безграничной среде, в которой распространяется плоская синусоидальная звуковая волна (для краткости употребляем общий термин «капля» для обозначения как жидкой капли, так и пузырька). Используем сферическую систему координат  $(r, \vartheta)$ , начало которой совпадает с центром капли в среднем по времени положении, полярная ось совпадает с направлением распространения волны. Выражение для потенциала скорости частиц жидкости в плоской волне имеет вид:

$$\begin{aligned} \varphi &= \Phi \cdot \exp \left[ i(\omega t - kr \cdot \cos \vartheta) \right] \\ &= \Phi e^{i\omega t} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)(-i)^n j_n(kr) P_n(\cos \vartheta), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Phi$  – амплитуда потенциала,  $\omega$  – угловая частота колебаний,  $t$  – время,  $k=\omega/c$ ,  $c$  – скорость звука,  $j_n$  – сферические функции Бесселя,  $P_n$  – полиномы Лежандра; смысл имеет вещественная часть написанного выражения. Правая часть в (1) есть разложение плоской волны в ряд по полиномам Лежандра. В дальнейшем временной множитель опускаем. Решение уравнения Гельмгольца для возмущенного потенциала во внешней (по отношению к капле) области должно иметь вид

$$\psi = \sum_{n=0}^{\infty} A_n h_n(kr) P_n(\cos \vartheta), \quad (2)$$

а для полного потенциала во внутренней области

$$\psi' = \sum_{n=0}^{\infty} B_n j_n(k'r) P_n(\cos \vartheta). \quad (3)$$

Здесь  $A_n$  и  $B_n$  – неизвестные константы,  $h_n$  – сферические функции Ханкеля второго рода, штрихами снабжаются величины, относящиеся к жидкости внутри капли. Слагаемые в сумме (2) представляют собой моды потенциала рассеянного каплей звука. Скорость частиц жидкости вне и внутри капли дается, соответственно, выражениями  $grad(\varphi + \psi)$  и  $grad\psi'$ .

На поверхности капли должны выполняться условия

$$\delta p' - \delta p \Big|_{r=a} = T \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) + p - p', \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} (\varphi + \psi) - \frac{\partial \psi'}{\partial r} \Big|_{r=a} = 0, \quad (5)$$

где  $a$  – радиус невозмущенной капли,  $\delta p$  – возмущение давления,  $p$  – статическое давление,  $T$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $R_1$  и  $R_2$  – главные радиусы кривизны поверхности раздела жидкостей; предполагается также, что величины возможных деформаций капли малы по сравнению с длиной капиллярных волн и с радиусом  $a$ .

В [7] показано, что в линейном приближении

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{2}{a} - \frac{2\xi}{a^2} - \frac{1}{\sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left( \sin \vartheta \frac{\partial \xi}{\partial \vartheta} \right), \quad (6)$$

где  $\xi$  – величина отклонения в радиальном направлении элемента поверхности от невозмущенного положения. Разлагая  $\xi$  в ряд по полиномам Лежандра и используя их известные свойства, запишем (6) в виде

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} &= \frac{2}{a} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{a^2} (n-1) \times \\ &\times (n+2) \xi_n P_n(\cos \vartheta) \end{aligned}, \quad (7)$$

где  $\xi_n$  – коэффициенты в разложении

$$\xi = \sum_{n=0}^{\infty} \xi_n P_n(\cos \vartheta); \quad \xi_0 - \text{амплитуда сферических}$$

пульсаций капли,  $\xi_1$  (помноженное на  $P_1 = \cos \vartheta$ )

описывает смещение капли как целого от положения равновесия, остальные  $\xi_n$  – максимальные амплитуды колебания деформационных мод.

Очевидно,  $\partial \xi / \partial t = \partial \psi' / \partial r \Big|_{r=a}$ ; поэтому из (6),

(7) и (3) следует

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) &= \frac{1}{a^2} \times \\ &\times \sum_{n=0}^{\infty} (n-1)(n+2) B_n \frac{dj_n(k'r)}{dr} \times \\ &\times P_n(\cos \vartheta) \Big|_{r=a} \end{aligned} \quad (8)$$

Дифференцируя теперь обе стороны равенства (4) по времени, учитывая соотношения

$$\delta p = -\rho \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial t} \right), \quad \delta p' = -\rho' \frac{\partial \psi'}{\partial t},$$

( $\rho$  – невозмущенная плотность жидкости), и пользуясь формулами (1), (2), (3), (8), перепишем (4) в виде

$$A_n h_n(z) + B_n \times \left\{ \frac{T(n-1)(n+2)}{\rho a^3 \omega^2} \cdot \frac{dj_n(z')}{dz'} - \frac{\rho'}{\rho} j_n(z') \right\} = \quad (9)$$

$$= -\Phi(2n+1)(-i)^n j_n(z)$$

для любого значения  $n$ . Здесь  $z = ka$ ,  $z' = k'a$ . Аналогично, вместо (5) имеем

$$A_n \frac{dh_n(z)}{dz} \cdot k - B_n \frac{dj_n(z')}{dz'} \cdot k' = \quad (10)$$

$$= -\Phi(2n+1)(-i)^n \frac{dj_n(z)}{dz} \cdot k$$

Из (9) и (10) следует для амплитуды потенциала  $n$ -й моды рассеянного поля

$$A_n = \frac{X}{Y}, \quad (11)$$

где

$$X = \Phi(2n+1)(-i)^n \left\{ \frac{k'}{k} j_n \cdot \frac{dj'_n}{dz'} - \frac{dj_n}{dz} \times \right.$$

$$\times \left[ \frac{\rho'}{\rho} j'_n - \frac{Tz'}{\omega^2 \rho a^3} \cdot \frac{dj'_n}{dz'} (n-1)(n+2) \right] \Big\}$$

$$Y = \frac{dh_n}{dz} \left[ \frac{\rho'}{\rho} j'_n - \frac{Tz'}{\omega^2 \rho a^3} \cdot \frac{dj'_n}{dz'} (n-1)(n+2) \right] -$$

$$- h_n \frac{k'}{k} \cdot \frac{dj'_n}{dz'}$$

здесь  $j'_n = j_n(z')$ .

В полученном решении пока еще не предполагается малость капли; значения параметра  $ka = 2\pi a / \lambda$  ( $\lambda$  – длина волны звука) могут быть любыми. Для нулевой моды ( $n=0$ )

$$h_0(kr) = i \exp(-ikr) / kr, \quad j_0(kr) = \sin kr / kr;$$

поэтому (11) упрощается к виду

$$A_0 = \frac{i\Phi \left[ \frac{\sin ka}{ka} + \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \left( \cos ka - \frac{\sin ka}{ka} \right) \right] \cdot ka e^{ika}}{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} (1 + ika)}, \quad (12)$$

где

$$\frac{\omega_0^2}{\omega^2} = \frac{\rho' \cdot \sin k'a / \rho}{\sin k'a - k'a \cos k'a} - \frac{2T}{\omega^2 \rho a^3}. \quad (13)$$

Для частного случая малой капли ( $ka \ll 1$ ,  $k'a \ll 1$ ), разлагая синус и косинус в ряды по степеням малого аргумента и ограничиваясь нужным числом слагаемых в разложениях, получаем вместо (12) и (13)

$$A_0 = \frac{i\Phi ka (1 - \omega_0^2 k^2 a^2 / 3\omega^2)}{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} (1 + ika)}, \quad (14)$$

$$\frac{\omega_0^2}{\omega^2} = \frac{3\rho'}{\rho k'^2 a^2} - \frac{2T}{\omega^2 \rho a^3}, \quad (15)$$

где  $\omega_0$  – резонансная частота нулевой моды. Из (15) следует, что резонанс возможен, если  $\rho' / \rho \ll 1$ , то есть если капля представляет собой газовый пузырек (в жидкости); поэтому вблизи резонанса вторым слагаемым в числителе (14) можно пренебречь. Для политропного газового пузырька (15) переходит в

$$\omega_0^2 = \frac{3\gamma p}{\rho a^2} + \frac{2T}{\rho a^3} (3\gamma - 1) \quad (16)$$

( $\gamma$  – показатель политропы). Результаты (14), (16) получены в [8] без учета поверхностного натяжения, полностью формула (16) приводится, например, в [1]. Полное эффективное сечение резонансного рассеяния для нулевой моды  $\sigma_0$ , а также относительная ширина  $\Delta\omega / \omega_0$  резонансной

кривой  $|A_0|^2(\omega)$ , построенной по формуле (14), даются выражениями

$$\sigma_0 = \frac{4\pi}{k_0^2}, \quad \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = k_0 a_0, \quad k_0 = \frac{\omega_0}{c}, \quad (17)$$

где  $a_0$  – резонансный радиус пузырька для нулевой моды. Эти формулы будем использовать для сравнения с характеристиками других мод рассеянного излучения.

При анализе остальных мод ( $n=1,2,\dots$ ) всегда предполагается выполнение неравенств  $ka \ll 1$ ,  $k'a \ll 1$ . Нужные для дальнейшего асимптотические формулы для сферических функций Бесселя и Ханкеля (второго рода) имеют вид [9]

$$h_n(kr) \Big|_{kr \ll 1} = \frac{i(2n-1)!!}{(kr)^{n+1}} + \frac{(kr)^2}{(2n+1)!!},$$

$$j_n(kr) \Big|_{kr \ll 1} = \frac{(kr)^n}{(2n+1)!!}, \quad (18)$$

$$h_n(kr) \Big|_{kr \gg 1} = i^{n+1} e^{-ikr} / kr.$$

Подставляя первые две формулы из (18) в (11), получаем после вычислений

$$A_n = \frac{(-i)^{n+1} \Phi(ka)^{2n+1} \left[ \frac{\rho'}{\rho} \left( \frac{\omega_n^2}{\omega^2} - 1 \right) + 1 + \frac{n}{n+1} \frac{\omega_n^2}{\omega^2} \right]}{[(2n-1)!!]^2 \left( \frac{\omega_n^2}{\omega^2} - 1 \right) \left( 1 + \frac{n+1}{n} \frac{\rho'}{\rho} \right) + \frac{i(ka)^{2n+1}}{(n+1)}} \quad (19)$$

$$\omega_n^2 = \frac{T \cdot n(n-1)(n+2)}{\rho a^3 \left( \frac{n}{n+1} + \frac{\rho'}{\rho} \right)}, \quad (20)$$

$\omega_n$  – резонансная частота  $n$ -й моды. При вычислении мнимой части в знаменателе (19) принималось  $\omega = \omega_n$ , так как при частоте, сколько-нибудь заметно отличающейся от резонансной частоты, мнимая часть пренебрежимо мала по сравнению с вещественной частью знаменателя, и ею следует пренебречь. Потенциал рассеянного поля для каждой моды на больших расстояниях ( $kr \gg 1$ ) дается выражением (с учетом (18))

$$\psi_n = \frac{i^{n+1} A_n e^{-ikr}}{kr} P_n(\cos \vartheta). \quad (21)$$

Для первой моды ( $n=1$ ) из (19) следует (по порядку величины)

$$|A_1| \approx |\Phi| \cdot (ka)^3,$$

так что рассеянное поле (дипольное излучение) весьма слабое. Резонанс здесь не имеет места, капля как целое совершает колебательное поступательное движение в отсутствие упругих связей, стремящихся вернуть каплю в среднее (равновесное) положение. Для всех остальных мод ( $n=2,3,\dots$ ) значения величин  $A_n$  (19) в отсутствие резонанса также весьма малы. В случае резонанса какой-либо моды ( $\omega_n/\omega = 1$ ) из (19) следует

$$A_n = (2n+1)(-i)^{n+2} \Phi_n; \quad (22)$$

$\Phi_n$  – амплитуда потенциала плоской волны, в поле которой возникает резонанс  $n$ -й моды. На больших расстояниях, согласно (21),

$$\psi_n = -\frac{i(2n+1)\Phi_n}{k_n r} e^{-ik_n r} P_n(\cos \vartheta), \quad k_n = \frac{\omega_n}{c}.$$

Отсюда следует выражение для дифференциального сечения рассеяния

$$d\sigma_n = (2n+1)^2 P_n^2(\cos \vartheta) d\Omega / k_n^2$$

( $d\Omega$  – элемент телесного угла), а полное сечение рассеяния дается формулой

$$\sigma_n = \frac{4\pi(2n+1)}{k_n^2}. \quad (23)$$

Относительная ширина резонансной кривой  $|A_n|^2(\omega)$ , вычисленная с помощью (19) так же, как это было сделано выше для нулевой моды, равна

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_n} = \frac{(k_n a_n)^{2n+1}}{[(2n-1)!!]^2 (n+1) \left( 1 + \frac{n+1}{n} \frac{\rho'}{\rho} \right)}, \quad (24)$$

где  $a_n$  – резонансный радиус капли (для  $n$ -й моды).

Сравнение (23) и (24) с (17) показывает различие резонансного рассеяния нулевой и  $n$ -й мод. Видно, что острота резонансной кривой растет с ростом номера моды. Также видно, что отношение мощностей излучения  $n$ -й и нулевой мод  $Q_n/Q_0$  равно

$$\frac{Q_n}{Q_0} = (2n+1) \frac{|\Phi_n|^2}{|\Phi_0|^2}. \quad (25)$$

Рассмотрим также отношение резонансных амплитуд колебаний поверхности капли для  $n$ -й и нулевой мод  $|\xi_n|/|\xi_0|$ . Поскольку

$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{\partial \psi'}{\partial r} = \frac{\partial(\psi + \varphi)}{\partial r}$  при  $r=a$  (см. (5)), то, учитывая, что в резонансе, очевидно, можно пренебречь величиной  $\varphi$  по сравнению с  $\psi$ , имеем для амплитуд деформационных мод ( $n \geq 2$ )

$$i\omega_n \xi_n P_n(\cos \vartheta) = \frac{\partial \psi_n}{\partial r} \quad \text{при } r = a.$$

Отсюда, имея в виду (2), (19) (где  $\omega_n/\omega = 1$ ) и (18) (с асимптотическим значением  $h_n(z)$  для  $z \ll 1$ ), получаем

$$|\xi_n| = \frac{(2n+1)!!(n+1)|\Phi_n|}{c(k_n a_n)^{n+2}}.$$

Аналогично, для амплитуды сферических пульсаций имеем

$$|\xi_0| = \frac{|\Phi_0|}{c(k_0 a_0)^2}.$$

Полагая  $n$  небольшим, имеем (грубо)

$$\frac{|\xi_n|}{|\xi_0|} \approx \frac{1}{(k_n a_n)^n} \frac{|\Phi_n|}{|\Phi_0|} \left( \frac{\omega_0 a_0}{\omega_n a_n} \right)^2. \quad (26)$$

Рассмотрим некоторые конкретные случаи. Если, например, газовый пузырек и капля произвольной жидкости находятся в поле одной и той же плоской волны, причем у пузырька возбуждается нулевая мода, а у капли –  $n$ -я мода, то, поскольку в данном случае  $\Phi_0 = \Phi_n$ ,  $\omega_0 = \omega_n = \omega$ , (25) и (26) переходят в

$$\frac{Q_n}{Q_0} = (2n+1), \quad \frac{|\xi_n|}{|\xi_0|} \approx \frac{1}{(ka_n)^n} \left( \frac{a_0}{a_n} \right)^2.$$

Отсюда видно, что мощности излучения различных мод у капли и пузырька – величины одного порядка, а амплитуды колебаний поверхности существенно различаются; из последнего соотношения следует  $|\xi_n|/|\xi_0| \gg 1$ , если только  $a_0/a_n$  не является аномально малой величиной.

Рассмотрим теперь случай газового пузырька, у которого поочередно возбуждаются (различными плоскими волнами) нулевая и  $n$ -я моды. Здесь  $a_0 = a_n = a$ , поэтому вместо (26) имеем

$$\frac{|\xi_n|}{|\xi_0|} \approx \frac{1}{(k_n a)^n} \frac{|\Phi_n|}{|\Phi_0|} \left( \frac{\omega_0}{\omega_n} \right)^2. \quad (27)$$

В цитированной выше работе [2] сравнивались, в частности, монопольное и квадрупольное излучения, обусловленные свободными колебаниями воздушного пузырька в воде в предположении, что  $|\xi_2|/|\xi_0| = 1$ . Радиус пузырька  $a = 33 \cdot 10^{-4}$  м, соответствующие (собственные) частоты  $\omega_0 = 2\pi \cdot 10^3$  рад/с,  $\omega_2 = 2\pi \cdot 25$  рад/с. Тогда из (27) следует (если положить  $c \approx 10^3$  м/с)  $|\Phi_2|/|\Phi_0| \approx 10^{-10}$ . Это означает, что если данные моды возбуждаются плоскими волнами, то равенство амплитуд колебаний поверхности пузырька для этих мод возможно только если волна, вызывающая

квадрупольное излучение, является весьма слабой сравнительно с волной, вызывающей монопольное излучение звука. В этом случае из (25) следует, что

отношение мощностей излучения  $Q_2/Q_0$  весьма мало, что согласуется с утверждением, высказанным в [2]. Но если амплитуды потенциала этих двух волн сравнимы по порядку величины друг с другом, то и соответствующие мощности являются величинами одного порядка, согласно (25). При этом  $|\xi_2|/|\xi_0| \gg 1$ , как это следует из (27). Если же для этих двух волн одинаковы интенсивности или амплитуды давления, то  $|\Phi_2|/|\Phi_0| = \frac{\omega_0}{\omega_2} = 40$ , а из

(25) и (27) следует, что  $Q_2/Q_0 \gg 1$ ,  $|\xi_2|/|\xi_0| \gg 1$ . Таким образом, приходим к выводу, что интенсивное рассеяние звука может быть вызвано резонансным возбуждением не только нулевой моды колебаний газового пузырька, но и других мод, связанных с деформацией как пузырька, так и жидкой капли.

#### Литература

1. Под ред. В.И.Мясищева. Физические основы подводной акустики. М.: Сов. радио, 1955. 740 с.
2. M. Strasberg. Gas bubbles as sources of sound in liquids. Journ. Acoust. Soc. Amer. 1956. vol. 28. № 1. pp. 20-26.
3. V.C. Anderson. Sound scattering from a fluid sphere. Journ. Acoust. Soc. Amer. 1950. vol. 22. № 2. pp. 426-431.
4. Skaropoulus N.C., Yagridou H.D., Chrissoulidis D.P. Interactive resonant scattering by a cluster of air bubbles in water. Journ. Acoust. Soc. Amer. 2003. vol. 113. № 5. pp. 3001-3011.
5. Насибуллаева Э.Ш., Ахатов И.Ш. Динамика пузырькового кластера в акустическом поле // Акустич. журн. 2005. Т. 51. № 6. С.813-821.
6. P.Marston. Shape oscillaton and static deformation of drop and bubbles driven by modulated radiation stresses – Theory. Journ. Acoust. Soc. Amer. 1980. vol. 67. № 1. pp. 15-26.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
8. Minnaert F.M. On musical air-bubbles and the sound of running water. Phil. Mag. 1933. vol. 16. pp. 235-248.
9. Под ред. М. Абрамовича, И. Стиган. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. 832 с.

#### References

1. Red. V.I. Myasishchev. Fizicheskie osnovy podvodnoy akustiki. Moscow: Sov. radio, 1955.
2. M. Strasberg. Gas bubbles as sources of sound in liquids. Journ. Acoust. Soc. Amer. 1956. vol. 28, № 1, pp. 20-26.
3. V.C. Anderson. Sound scattering from a fluid sphere. Journ. Acoust. Soc. Amer. 1950. vol. 22, № 2, pp. 426-431.
4. Skaropoulus N.C., Yagridou H.D., Chrissoulidis D.P. Interactive resonant scattering by a cluster of air bubbles in water. Journ. Acoust. Soc. Amer. 2003. vol. 113, № 5, pp. 3001-3011.
5. E. Sh. Nasibullaeva, I. Sh. Akhatov Dinamika puzyrkovgo klastera v akusticheskom pole. Akustich. zhurnal. 2005. vol. 51, № 6. pp.813-821.
6. P.Marston. Shape oscillaton and static deformation of drop and bubbles driven by modulated radiation stresses – theory. Journ. Acoust. Soc. Amer. 1980. vol. 67, №1, pp. 15-26.
7. L.D. Landau, Ye.M. Lifshits Gidrodinamika. Moscow: Nauka, 1986.
8. Minnaert F.M. On musical air-bubbles and the sound of running water. Phil. Mag. 1933. vol. 16, pp. 235-248.
9. Red. M. Abramovich, I. Stigan.Spravochnik po spetsialnym funktsiyam. Moscow: Nauka, 1979.

**УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

УДК 62-526

**ПРИНЦИПЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ  
УСТАНОВКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ****Павел Михайлович Орлов**

аспирант кафедры систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: orlov\_p\_m@mail.ru

**Виталий Михайлович Сидоров**

аспирант кафедры систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: v\_sidorov@ksrc.ru

**Юрий Леонардович Сиек**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Систем автоматического управления  
и бортовой вычислительной техники  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: siek@mail.ru

**Игорь Африканович Чичерин**

кандидат технических наук  
начальник сектора экспериментальных исследований ходкости кораблей и судов  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»  
196158, Санкт-Петербург, Московской шоссе, 44  
e-mail: 10\_otd@ksrc.ru

**Аннотация**

В работе обоснована необходимость и важность проведения гидродинамических испытаний гребных винтов. Рассмотрены принципы модернизации экспериментальной установки свободной воды для испытания гребных винтов морских судов. Проведен анализ структуры и предложен вариант ее совершенствования в направлении повышения точности проводимых в ходе испытаний измерений. Обоснован переход от электроприводов на постоянном токе к более технологичным частотно-регулируемым асинхронным двигателям с короткозамкнутым ротором. Проанализированы основные методы управления АД экспериментальной установки. Освещены проблемы бездатчикового векторного управления. Рассмотрена необходимость предварительной и текущей идентификации параметров двигателя. Обоснована рациональность повышения степени интеллектуальности бездатчикового векторного управления. Предложена обобщенная структура частотно-регулируемого привода экспериментальной установки. Отмечена возможность синтеза систем управления электропривода с элементами искусственного интеллекта.

**Ключевые слова:** гребной винт, экспериментальная установка, методы управления, предварительная и текущая идентификация, интеллектуальное управление.

**PRINCIPLES OF PROPELLER OPEN-WATER TESTING  
FACILITY MODERNIZATION FOR TEST SCREWS****Pavel M. Orlov**

Graduate student of department of automatic control systems and onboard computers  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: orlov\_p\_m@mail.ru

**Vitaliy M. Sidorov**

Graduate student of department of automatic control systems and onboard computers  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: v\_sidorov@ksrc.ru

**Yuri L. Siek**

the docent, Dr.Sci.Tech.  
the head of department of automatic control systems and onboard computers  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: siek@mail.ru



**Igor A. Chicherin**

the Candidate of Technical Sciences  
 the head of ship propulsion experimental research group  
 Krylov State Research Center  
 196158, St-Petersburg, Moskovskoe shosse, 44  
 e-mail: 10\_otd@ksrc.ru

**Abstract**

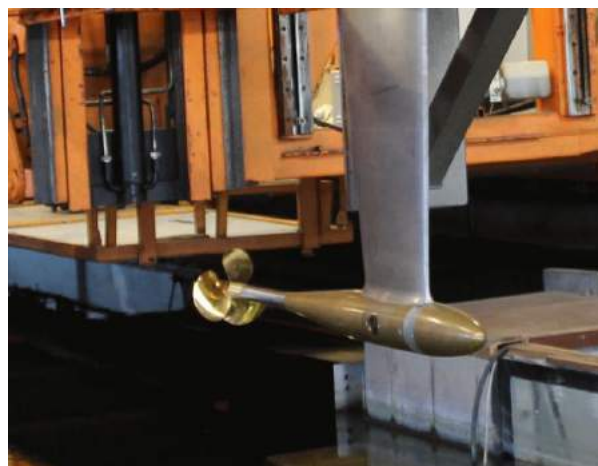
The necessity and importance of the propellers hydrodynamic tests was proved in this work. The principles of modernization of the experimental unit for open-water propellers tests of sea vessels models were considered. The analysis of structure is carried out and the way of its improvement is suggested in order to increase measurements accuracy. The change from direct current electric drives to more effective frequency-controlled asynchronous motors with a short-circuited rotor was confirmed. The main methods of control of the asynchronous motor experimental setup were analyzed. The problems of Sensorless vector control are described. The necessity of preliminary and current identification of engine parameters were considered. The rationality of increasing the degree of Sensorless vector control intelligence was confirmed. The generalized structure of the frequency-controlled drive of the experimental unit was suggested. The possibility of electric drive control systems and elements of artificial intelligence synthesis was noted.

**Key words:** propeller, open-water testing facility, control methods, pre-and current identification, intelligent control.

**Введение**

Судовые двигатели являются главными потребителями вырабатываемой энергии на судне. Их совершенствование эффективно сказывается на экономике морского транспорта в первую очередь за счет уменьшения эксплуатационных расходов [1]. В судостроении применяются различные типы двигателей. На данный момент наибольшее распространение получил гребной винт (ГВ). ГВ – одна из самых важных и дорогостоящих деталей судна. Проект ГВ для каждого судна уникален. Диаметр натурального гребного винта может достигать до 10.4 м, а вес – 113 тонн. Правильно спроектированный ГВ – одна из приоритетных задач, ошибки, при решении которой, могут привести к существенным экономическим потерям.

Испытания моделей гребных винтов и двигательных комплексов являются одними из основных видов гидродинамических экспериментальных исследований в опытовых бассейнах. Их результаты необходимы для эффективного решения проектно-конструкторских задач в области современного судостроения. На международной конференции опытовых бассейнов (ИТТС) 2014 (последняя редакция) были рекомендованы методики и нормативы, предъявляемые к экспериментальным установкам (ЭУ) свободной воды, используемым при проведении модельных испытаний гребных винтов. Такого рода исследования проводятся во всех крупнейших зарубежных опытовых бассейнах, таких, как: лаборатория SSPA, университет Chalmers, Швеция; институт MARIN, Нидерланды; опытовый бассейн SVA, Потсдам, Германия (рис.1); опытовый бассейн Дэвида Тейлора, США; университет Ньюкасл, Англия; опытовый бассейн Сеульского национального университета SNUTT, Сеул, Южная Корея (рис. 2) и др.



*Рисунок 1. Экспериментальная установка свободной воды, SVA, Потсдам, Германия*



*Рисунок 2. Экспериментальные установки свободной воды, SNUTT, Сеул, Южная Корея*

В Российской Федерации подобное оборудование установлено во ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Отделение ходкости центра занимается исследованиями гидродинамических характеристик кораблей и судов, а также разработкой различных пропульсивных комплексов. Результаты экспериментов являются важным элементом их разработки. Проектирование гребного винта включает в себя следующие этапы:

1. Проектирование гребного винта с использованием численных методов;
2. Изготовление модели гребного винта;
3. Испытание модели гребного винта в опытовом бассейне и кавитационных трубах;
4. Корректировка геометрии ГВ по результатам модельных испытаний в случае необходимости.

Полученные в ходе модельных испытаний гребных винтов результаты позволяют определять ходовые и тяговые характеристики кораблей и судов. Их высокая точность достигается благодаря применению уникальной стендовой базы, в состав которой входит экспериментальная установка с винтовым динамометром, предназначенная для проведения испытаний моделей гребных винтов в «свободной воде».

**1. Структура экспериментальной установки**

Установка свободной воды (рис. 3) является сложным инженерно-техническим сооружением. Она закрепляется на буксировочной тележке при помощи продольных ферм и представляет собой винтовой динамометр (10), закрепленный в гондоле (9), соединенный с электродвигателем, расположенным на моторной раме (1), посредством вертикального трансмиссионного вала (8), проходящего внутри стойки гондолы (7). Из винтового динамометра вперед, консольно, выходит гребной вал (11). Длина гребного вала должна обеспечить достаточное удаление гребного винта (12) от обтекателя динамометра и не допускать значительных вибраций. В винтовом динамометре измеряемые усилия уравниваются реакцией упругих элементов, деформация которых преобразуется в электрические сигналы. Вид электрического сигнала зависит от типа датчика. Если датчик индуктивного типа, то измеряемые нагрузки пропорциональны частоте сигнала, если используются тензодатчики, то измеряемые нагрузки пропорциональны величине напряжения сигнала [2].

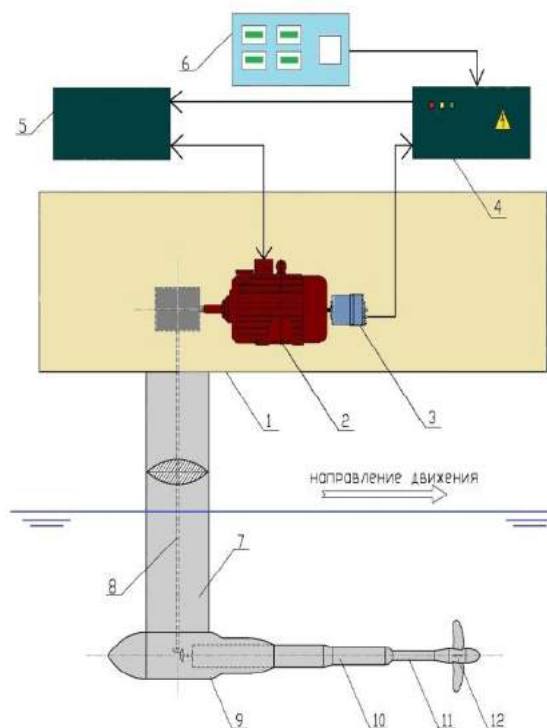


Рисунок 3. Структурная схема установки свободной воды.

- 1 – моторная рама; 2 – электродвигатель; 3 – тахогенератор; 4 – шкаф управления; 5 – ЭМУ; 6 – пульт механика; 7 – стойка гондолы; 8 – трансмиссионный вал; 9 – гондола экспериментальной установки; 10 – винтовой динамометр; 11 – гребной вал винтового динамометра; 12 – модель гребного винта с передним и задним обтекателями.

В установке свободной воды в качестве автоматизированного привода используется электродвигатель постоянного тока (2). Для управления и регулирования частоты вращения автоматизированного электропривода применяется электромашинный усилитель (ЭМУ) (5), а в качестве системы обратной связи по скорости – аналоговый тахогенератор (3). Использование данного электропривода обусловлено простотой реализации закона управления по скорости вращения исполнительного двигателя ввиду большого коэффициента усиления по мощности ЭМУ, легкостью изменения направления вращения электродвигателя при изменении полярности напряжения, задаваемого на входе системы управления (4), что позволяет обеспечивать реверсирование исполнительного двигателя. Однако данный автоматизированный электропривод обладает рядом недостатков, присущих электродвигателям постоянного тока.

Высокая инерционность, сложность обслуживания, ограниченный срок службы из-за износа коллектора, наличие остаточного напряжения ЭМУ и шум при его работе. ЭДС, наводимая в якоре потоком остаточного магнетизма, искажает линейную зависимость выходного напряжения от входного сигнала в зоне малых сигналов и нарушает однозначность зависимости выходных параметров электромашинных усилителей от входных при изменении полярности входного сигнала.

Одним из основных направлений модернизации экспериментальной установки для испытаний гребных винтов является повышение качества стабилизации частоты вращения гребного вала, обеспечивающего требуемую точность проводимых измерений физических величин.

## 2. Выбор привода экспериментальной установки

Технический прогресс и конкуренция приводят к постоянному росту производительности и повышению степени автоматизации технологического оборудования. При этом возрастают требования, предъявляемые к регулируемым электроприводам, по таким параметрам, как диапазон регулирования частоты вращения, точность позиционирования и перегрузочная способность. Для обеспечения современных требований к экспериментальным установкам разработаны такие высокотехнологичные устройства современного электропривода, как частотно-регулируемый привод (ЧРП), который в широком диапазоне регулирования скорости гарантирует высокоточные процессы движения и реализует их хорошую повторяемость. ЧРП становятся сегодня наиболее высокотехнологичной составляющей современной промышленности [3].

Частотно-регулируемый привод состоит из частотного преобразователя и асинхронного или синхронного электродвигателя. Применение синхронных электродвигателей сдерживает ряд характерных недостатков: конструкция мотора выполнена по более сложной схеме, пусковые свойства, а также сложность регулирования частоты вращения, которое возможно только путем изменения частоты питающего напряжения. Устройство асинхронного двигателя (АД) характеризуется предельной простотой, а их эффективность очень высока, так как отсутствуют потери на трение в коллекторе. Двигатели имеют относительно высокий коэффициент мощности.

Большинство используемых электродвигателей переменного тока являются асинхронными, имеющими короткозамкнутый ротор. Их широкое применение в первую очередь обуславливается легкостью в обслуживании, простотой конструкции, низкой стоимостью и высокой надежностью. К недостаткам АД можно отнести трудность регулирования скорости (переключением числа пар полюсов, либо частотой питающего напряжения), что ранее сдерживало их применение в высокотехнологичных отраслях промышленности.

Развитие силовой электроники и переход от микропроцессоров к микроконтроллерам позволяет нивелировать недостатки АД, а перечисленные достоинства позволяют говорить о рациональности

использования асинхронного двигателя в качестве исполнительного механизма для экспериментальной установки «свободной воды».

## 3. Выбор принципа управления АД ЭУ

Существуют различные методы управления асинхронным двигателем, которые позволяют решить различные задачи при регулировке скорости и изменения момента, среди которых – два основных – скалярный и векторный [4]. Каждый из них имеет свои характерные особенности.

Область применения скалярного метода управления связана с приводами насосов и вентиляторов. Кроме этого, частотные преобразователи со скалярным методом управления используют там, где важно поддерживать определенный технологический параметр. Изменение амплитуды, а также частоты питающего напряжения выступает в качестве основного принципа, на котором основывается данный метод. Скалярное управление достаточно просто реализуется, но при этом следует отметить ряд его недостатков. В первую очередь, если на вал не устанавливается специализированный датчик скорости, то высокоточная регулировка значения скорости вала вызывает определенные трудности. Узкий диапазон скоростного регулирования, низкий момент на малых скоростях и сложность работы с динамически развивающейся нагрузкой, также являются недостатками скалярного метода управления.

Лишен основных недостатков скалярного управления двигателем векторный метод, при котором формируется не только гармонические токи (напряжения) фаз, но и обеспечивается управление магнитным потоком ротора, а именно, моментом на валу электродвигателя. Векторное управление применяется в случае, когда в процессе эксплуатации нагрузка может меняться на одной и той же частоте вращения, т.е. нет четкой зависимости между моментом нагрузки и скоростью вращения, а также в случаях, когда необходимо получить расширенный диапазон регулирования частоты вращения при номинальных моментах.

При управлении двигателем сложно добиться заданной частоты вращения вала. На этот процесс оказывают значительное влияние такие параметры как: температура двигателя, рассеивание магнитного поля, вихревые токи, сопротивление обмоток двигателя. Данные параметры могут сильно меняться в зависимости от температуры окружающей среды, степени нагрузки на двигатель и т.д. Наличие датчика частоты вращения на валу двигателя дает возможность обеспечить обратную связь с приводом двигателя, что позволяет корректировать управляющие параметры двигателя. Однако датчик частоты вращения применяется довольно редко. Это вызвано его относительно высокой стоимостью, а также тем, что не всегда удается его установить либо из-за конструктивных особенностей двигателя, либо особенностей эксплуатации.

В настоящее время в мире ведутся разработки и исследования различных новых вариантов построения систем управления электроприводом. Особенно актуальными стали системы бездатчикового векторного управления. Это связано

с тем, что, во-первых, такие системы снижают стоимость электропривода в целом, во-вторых, такие системы решают ряд проблем, возникающих при наличии в системе датчика, например, необходимость дополнительных линий коммуникации между датчиком и системой управления, что снижает степень надежности. Также, следует отметить, что иногда установка датчика положения ротора в принципе невозможна. Проблем при эксплуатации бездатчиковых систем несколько. Во-первых, качество их работы, как правило, существенно ниже по сравнению с датчиковыми системами – в таких системах необходимы специальные алгоритмы для осуществления оценки вектора состояния привода. Качество решения данной задачи зависит от точности задания параметров модели двигателя, что приводит к необходимости использования алгоритмов предварительной и текущей идентификации, от

точности измерения напряжений и токов, от принципа организации самого алгоритма и т.д. Во-вторых, алгоритмы оценки вектора состояния обладают определенной динамикой (скоростью сходимости), которая накладывает ограничения на быстродействие всей системы.

Для компенсации влияния указанных факторов рационально повышение степени интеллектуальности систем управления, а также организация непрерывного оценивания значений меняющихся параметров двигателя. От точности их определения зависит качество работы всей системы в целом. Поэтому целесообразно применение алгоритмов как начальной, так и текущей идентификации параметров асинхронного двигателя и использования получаемых результатов в алгоритме управления, реализующем элементы искусственного интеллекта.

4. Вариант реализации системы управления ЧРП

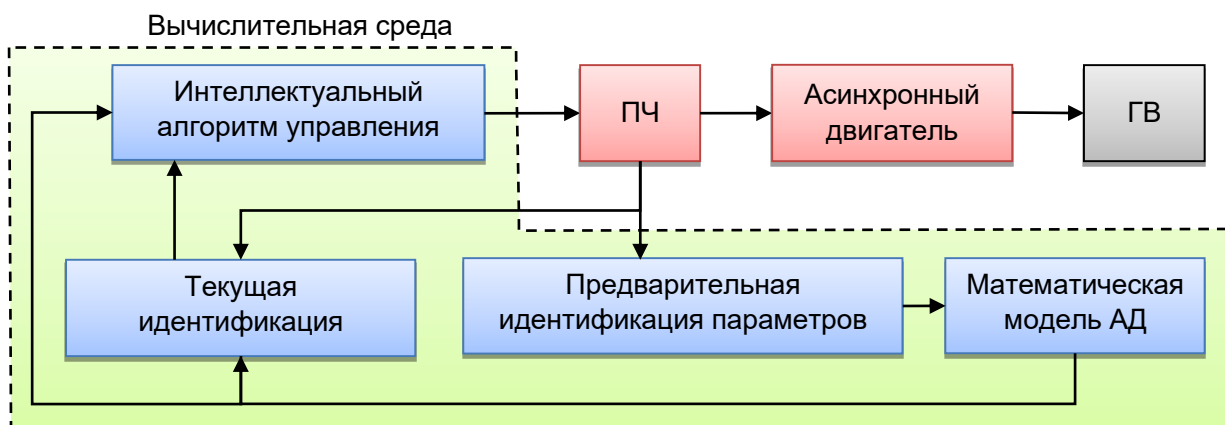


Рисунок 4. Структурная схема ЧРП.

На рисунке 4 представлена обобщенная структура частотно-регулируемого привода экспериментальной установки. Аппаратная часть ЧРП, не охваченная вычислительной средой, состоит из асинхронного электродвигателя, обмотка статора которого подключена к преобразователю частоты, который представляет собой электронное устройство, предназначенное для управления АД переменного тока. Данный преобразователь обеспечивает плавное регулирование скорости электродвигателя путем преобразования фиксированных значений напряжения и частоты сети в измеряемые величины. [5]. Момент, действующий на ось двигателя, представлен гребным винтом и может быть вычислен путем суммирования сил, действующих на отдельные элементы, представляющие собой сечения лопастей цилиндрами, соосными с ГВ [1].

Вычислительная среда программно реализует необходимое алгоритмическое обеспечение, которое решает следующие задачи: предварительная идентификация, текущая идентификация, формирование математической модели АД и управление на основе применения технологий искусственного интеллекта.

Обобщенная асинхронная машина содержит трехфазную обмотку статора и ротора. Данные обмотки подключены к симметричным трехфазным

источникам напряжения. Математическое описание такой машины базируется на известных законах. Уравнения равновесия ЭДС на обмотках записываются в соответствии со вторым законом Кирхгофа, потокосцепление обмоток находится на основе закона Ампера, а уравнение равновесия моментов на валу машины определяется на основе второго закона Ньютона. Схема асинхронной машины с короткозамкнутым ротором формируется из обобщенной путем замыкания обмоток ротора накоротко [7].

Функция предварительной идентификации параметров математической модели двигателя – важная составляющая алгоритмического обеспечения бездатчикового электропривода. В зависимости от ситуации, в ходе предварительной идентификации определяются оценки требуемых параметров АД. Активная идентификация подразумевает применение специальных тестовых воздействий, пассивная – напротив, основывается только на измерениях электрических переменных в рабочих процессах и на оценках координат состояния. Полученные в ходе предварительной идентификации начальные значения параметров машины уточняются путем их текущей идентификации [6].

При реализации алгоритмов текущей идентификации используются результаты прямых

измерений электрических величин. Алгоритм идентификации позволяет определить величину вариации параметров двигателя во время его рабочего режима и реконфигурировать алгоритм управления в соответствии с ней. В большинстве случаев, для вычисления параметров АД используется пассивная текущая идентификация.

Системы управления, построенные с использованием современной элементной базы и микропроцессорной техники, могут использовать технологии управления электроприводами, которые ранее были недоступны из-за технических ограничений. К числу таких технологий относится синтез систем электропривода с элементами искусственного интеллекта. Такой подход позволяет компенсировать влияние неполноты априорных знаний о физических процессах функционирования АД на управление. Обеспечение интеллектуальности может быть основано на реализации двух принципов: ситуационном управлении и технологиях обработки знаний. Ситуационное управление – это управление на основе анализа внешних ситуаций или событий. Информационные технологии, позволяющие создавать интеллектуальные СУ: экспертные системы, искусственные нейронные сети, нечеткая логика, генетические алгоритмы и ряд других. Структурно интеллектуальные СУ содержат дополнительные блоки, выполняющие системную обработку знаний на основе указанных выше информационных технологий. Данные блоки могут выполнять либо как надстройка над обычным регулятором, либо непосредственно включаться в замкнутый контур управления [8].

#### Заключение

Решение задач по модернизации экспериментальной установки для испытаний гребных винтов определяется возможностью совершенствования аппаратного и программного обеспечения системы регулирования частотой

вращения гребного вала. В этой области рациональна ориентация на общие тенденции развития электроприводов. К ним относят:

- Неуклонное снижение доли приводов с двигателями постоянного тока и увеличение области применения двигателей переменного тока.

- Преимущественное применение приводов с короткозамкнутыми асинхронными двигателями.

- Переход к широкодиапазонным быстродействующим приводам требует применения более сложных структур векторного управления.

- Отказ от датчиков механических переменных и переходу к системам бездатчикового управления, где для оценки механических координат привода (положения, скорости, ускорения) используются специальные алгоритмы идентификации.

- Программное обеспечение должно учитывать переход к специализированным процессорам с объектно-ориентированной системой команд, адаптированной к решению задач цифрового регулирования в реальном времени.

Наряду с этим необходимо упомянуть и определенные недостатки частотно-регулируемых электроприводов, которые нужно учитывать при модернизации экспериментальных установок:

- Преобразователь частоты при работе могут искажать питающую сеть, поэтому они должны быть оборудованы входными фильтрами.

- Формирование выходного напряжения преобразователя частоты происходит из прямоугольных импульсов амплитудой до 500 В, поэтому исполнительные двигатели должны иметь повышенную изоляцию обмоток.

Учет указанных тенденций и рассмотренных принципов в системе регулирования электропривода экспериментальной установки «свободной воды» позволяет ставить и решать задачи повышения точности определения характеристик ГВ при проектировании судовых движительных комплексов.

#### Литература

1. Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А. Судовые движители. Л.: Судостроение, 1988.
2. Борусевич В.О., Русецкий А.А., Соловьев И.А. Современные гидродинамические лаборатории. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2008.
3. Мурашкин С.И. Асинхронный частотный электропривод с векторным управлением. Вестник Красноярского государственного аграрного университета, 2012.
4. Баев А.П., Исаков А.С. Современные системы управления асинхронным электроприводом. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2006.
5. Морозова О.И. Применение искусственного интеллекта для управления асинхронным двигателем с частотным преобразователем. Сборник научных трудов Харьковского университета Воздушных Сил, 2015.
6. Терехин А.А., Даденков Д.А. Обзор способов идентификации параметров асинхронного электропривода. Вестник ПНИПУ, 2017.
7. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Издательство «Корона.Век», 2014.
8. Усков А.А., Кузьмин А.В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети нечеткая логика. М.: Горячая Линия – Телеком, 2004.

#### References

1. Artyushkov L.S., Achkinadze A.Sh., Rusetsky A.A. Ship propulsors. L.: Shipbuilding, 1988.
2. Borusevich V.O., Rusetsky A.A., Soloviev I.A. Modern hydrodynamic laboratories. St. Petersburg: Central Research Institute. acad. A.N. Krylova, 2008.
3. Murashkin S.I. Asynchronous frequency electric drive with vector control. Krasnoyarsk State Agrarian University Bulletin, 2012.
4. Baev AP, Isakov A.S. Modern control systems for asynchronous electric drives. Scientific and Technical Herald of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2006.

5. Morozova O.I. Application of artificial intelligence to control an induction motor with a frequency converter. Collection of scientific works of Kharkiv University of Air Forces, 2015.
6. Terekhin AA, Dadenkov DA Overview of methods for identifying the parameters of an asynchronous electric drive. Herald of PIPU, 2017.
7. Herman-Galkin SG Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC. SPb .: Publishing house "Korona.Vek", 2014.
8. Uskov AA, Kuzmin A.V. Intelligent control technologies. Artificial neural networks fuzzy logic. M .: Hot Line - Telecom, 2004.

**ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ**

УДК 004.942:004.031.043

**ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ АКТИВНОСТИ ОБУЧЕНИЯ ПРИ  
ПОСТРОЕНИИ КУРСА ЛЕКЦИЙ ГМТУ  
«КОМПЬЮТЕРНАЯ МАТЕМАТИКА – ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ»****Юрий Иванович Нечаев**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и информационных технологий

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, Лоцманская, 3  
e-mail: petr\_oleg@mail.ru**Аннотация**

Рассматриваются проблемы повышения активности обучения при разработке нового курса лекций «Компьютерная математика», который не читается в университетах России. Структура курса отражает основные тенденции развития концептуальных решений на основе творческого подхода к интеграции интеллектуальных технологий и высокопроизводительных вычислений. Особенности построения курса связаны с развитием новых подходов к моделированию динамики сложных систем в эволюционирующей среде. Это открывает перспективы создания интеграционных теорий и концептуальных решений при интерпретации динамических ситуаций в режиме экстренных вычислений. Такая интеграция осуществляется в рамках моделей динамической теории катастроф, ориентированной на преобразование информации в виде цепочки «моделирование – прогнозирование – принятие решений». Вычислительная среда КМ представлена как активная обучающая система на основе совокупности взаимодействующих объектов обучения, обеспечивающих информационные и управляющие связи взаимодействия в процессе приобретения и усвоения знаний. В качестве методов повышения активности обучения рассматривается подход на основе когнитивной парадигмы, методы Делфи и «Мозгового штурма». Приведены примеры реализации этих технологий в процессе выработки технических решений в области создания новой техники и технологий.

**Ключевые слова:** компьютерная математика, повышение активности обучения, интеллектуальные технологии, высокопроизводительные вычисления, эволюционная динамика.

**PROBLEMS OF INCREASING LEARNING ACTIVITY WHEN DEVELOPING A  
COURSE OF LECTURES OF STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY  
(GMTU) “COMPUTER MATHEMATICS - APPLIED ASPECTS”****Yuri I. Nechaev**Dr.Sci.Tech, Professor, Professor of the Department of Computing Engineering and Information Technologies  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: petr\_oleg@mail.ru**Abstract**

The problems reviewed, are on increasing the activity of learning in the development of a new course of lectures "Computer Mathematics", which has not been delivered in Russian universities. The course reflects the main trends in the development of conceptual solutions based on a creative approach to the integration of intelligent technologies and high performance computing. Features of the course are associated with the development of new approaches to simulation the dynamics of complex systems in an evolving environment. This opens up prospects for creating integration theories and conceptual solutions when interpreting dynamic situations in the mode of emergency calculations. Such integration is carried out within the framework of models of the dynamic theory of catastrophes, focused on the transformation of information in the form of a chain "modeling - forecasting - decision making". Environment of computer mathematics is presented as an active learning system based on a set of interacting learning objects that provide information and control interaction communication in the process of acquiring and assimilating knowledge. An approach based on the cognitive paradigm, Delphi and "Brainstorming" methods are considered as methods for increasing learning activity. Examples of implementation of these technologies in the process of developing technical solutions in the field of creating new equipment and technologies are given.

**Keywords :** computer mathematics, increased learning activity, intelligent technologies, high-performance computing, evolutionary dynamics.



### Введение

Развитие новых подходов к моделированию динамики сложных систем в эволюционирующей среде открывает перспективы создания интеграционных теорий и концептуальных решений при интерпретации динамических ситуаций в режиме экстренных вычислений (Urgent Computing – UC) [1] – [15]. Сложность и комплексность проблемы интеграции достижений искусственного интеллекта (ИИ) и высокопроизводительных вычислений потребовали разработки формализованной системы математической интерпретации знаний на основе методов компьютерной математики (КМ). Такая интеграция осуществляется в рамках концептуальных моделей динамической теории катастроф, ориентированной на преобразование информации в виде цепочки «моделирование – прогнозирование – принятие решений». Истоки формального аппарата КМ в приложении к рассматриваемой проблеме можно проследить на основе представлений математической системы в курсе лекций «Компьютерная математика», который изучается в университете Лафборо США с 1982 года и изложен в работе Д.Кук, Г.Бейз [3].

Исследования и разработки в области эволюционной динамики сложных систем, особенно нелинейных нестационарных систем (NN-систем) позволяют перестроить этот курс на основе достижений интеллектуальных технологий XXI века и современной теории катастроф. Рассмотрение КМ как эффективного инструмента интерпретации сложного взаимодействия позволяющий более гибко и адекватно описывать феномен поведения в условиях неопределенности и неполноты исходной информации. Формирование теоретических моделей КМ в различных приложениях связано с построением функций интерпретации эволюционной динамики диссипативных систем – исходного теоретического базиса проблемы. Поддержка процедур интерпретации сформулирована в виде принципов и концептуальных решений, позволяющих эффективно применять методы КМ в сложных динамических средах. Основные модели эволюционной динамики содержательно охватывают решение проблем реконструкции пространств поведения, управления и бифуркационного множества в условиях непрерывного изменения динамики объекта и внешней среды.

#### 1. Функциональное пространство интегрированной вычислительной среды КМ

Теоретические принципы, определяющие концептуальное пространство вычислительной среды КМ, реализуются в рамках эволюционной парадигмы интеллектуальных технологий и высокопроизводительных средств обработки. Интегрированная модель этой среды предоставляет единый математический аппарат интерпретации моделей ИИ.

Практическая реализация теоретических решений КМ рассмотрена на примерах формального аппарата исследований [5] – [8], связанных с обработкой информации при функционировании морского динамического объекта (МДО) в режиме UC [14].

Концептуальная модель обработки информации в вычислительной среде КМ представлена в виде преобразования:

$$U(F) = \langle F(R^n, R^r) : \{M(\tau) \times V(S) \times D(W)\} \rightarrow Y(R) \rangle, (1)$$

где  $U(F)$  – пространство вычислительной среды КМ;  $F(R^n, R^r)$  – функционал, определяющий процедуры интерпретации МДО в пространствах поведения и управления современной теории катастроф;  $M(\tau)$  – мультимодельный комплекс алгоритмов интерпретации эволюционной динамики;  $V(S)$  – множество элементов системы моделирования динамических ситуаций;  $D(W)$  – множество, содержащее процедуры генерации решений и выработку управляющих воздействий;  $Y(R)$  – множество, формирующее логические правила нечеткой формальной системы (НФС);  $\tau \in [t_0, t_k]$  – интервал времени реализации.

На основе модели (1) вычислительную среду КМ можно представить как активную обучающую систему (АОС) на основе [9].

**Определение 1.** АОС – совокупность взаимодействующих объектов обучения, обеспечивающих информационные и управляющие связи взаимодействия в процессе приобретения и усвоения знаний, включая отношения подчиненности и распределение процедур интеллектуальной поддержки (ИП) в эволюционирующей образовательной среде.

**Определение 2.** АОС состоит из *управляющего центра ИП* на верхнем уровне и *активных элементов – обучаемый и преподаватель*, поддерживающих процедуры обработки информации при реализации стратегии обучения в заданном интервале времени – на нижнем уровне.

**Определение 3.** *Стратегии функционирования* АОС реализуются с учетом предпочтений активных элементов в зависимости от состояния среды обучения на данном этапе эволюции и управляющих воздействий. *Допустимые множества состояний* АОС формируются в зависимости от среды взаимодействия активных элементов и используемых интеллектуальных и вычислительных технологий.

**Утверждение 1.** При формировании стратегий ИП используется *механизм информирования* и интеллектуального обеспечения активных элементов о результатах анализа альтернативных решений и выбора предпочтительной технологии обработки данных в рамках принципа конкуренции.

**Утверждение 2.** *Механизм функционирования* АОС определяется целевой функцией, допустимыми множествами решений, интервалом реализации, периодами функционирования в зависимости от стратегий интерпретации и управления в процессе эволюции обучения.

**Утверждение 3.** *Механизм управления* АОС формируется в виде совокупности стратегий ИП при заданной структуре активных элементов, информационном и алгоритмическом обеспечении процесса обучения в заданной среде и особенностей исследуемой задачи (ситуации).

Реализация АОС при моделировании прикладных задач интерпретации поведения МДО поддерживается системой ИП (рис.1).



Рис. 1. Модель процесса обучения: E1, E2, E3 – эксперты: методист, психолог и предметник

В этой системе используется модель обучения, которая осуществляет определенную последовательность операций в соответствии с текущим состоянием обучаемого и методикой обучения: генерируется исходная информация (задача интерпретации), требующая ответных действий обучаемого; производится сравнение полученного ответа с эталонным решением на основе концепции оптимального инструктора и диагностика возникающих ошибок; корректируются текущие характеристики обучаемого по результатам диагностики. Эта модель позволяет представить АОС в виде трех взаимодействующих интеллектуальных модулей (ИМ), обозначенных символом E1: ИМ по решению задач в заданной предметной области, ИМ по диагностике ошибок обучаемого и ИМ по планированию управления обучением.

В процессе функционирования модели обучения широко используются средства моделирования МДО и визуализация полученных результатов. При реализации виртуального моделирования отражаются все существенные детали динамической сцены для повышения адекватности модели реальному физическому процессу. Управляющий комплекс АОС посылает в систему визуализации информацию, содержащую данные об изменениях положений, ориентаций и других параметров динамической сцены.

Результатом использования в учебном процессе вычислительной среды КМ, реализующей достижения в области интеллектуальных технологий и высокопроизводительных вычислений, является повышение эффективности обучения и уровня подготовки специалиста, развитие его творческого подхода к обучению, снижение субъективных факторов при контроле и использовании знаний. Этот результат достигается за счет реализации адаптивной системы программного комплекса АОС. В случае отсутствия единого подхода к базовым понятиям обучающийся имеет возможность дать аргументированный и обоснованный ответ, который будет обработан с помощью НФС при активном участии обучаемого.

## 2. Феноменология КМ

Исследование сложного взаимодействия при построении процедур интерпретации поведения МДО в эволюционирующей среде (ЭС) позволяет

строить из простых компонент взаимодействия модель исследуемой ситуации, которая ведет себя аналогично реальной системе. В ЭС множество объектов взаимодействуют между собой так, что возникают широкомасштабные феномены поведения, не присущие отдельным объектам. Объекты среды взаимодействия, выявленные на основе концепции Data Mining [11] в виде «скрытых» знаний, подчиняются довольно простым законам и в совокупности демонстрируют коллективное поведение. Интерпретация такого поведения на основе методов КМ в ЭС свидетельствует о разнообразии феноменов и сложности взаимодействующих структур.

Только отдельные свойства интерпретируемых систем могут проявляться на все более крупных множествах взаимодействия вплоть до макроскопического уровня – изучение фазовых переходов при достижении некоторыми параметрами критических значений. Феноменология коллективных явлений при исследовании сложного поведения МДО чрезвычайно разнообразна и требует построения моделей КМ для различных приложений. Параметры ЭС взаимодействуя, образуют критические наборы значений, вблизи которых плавное изменение влечет резкое изменение структуры адаптивного поведения.

В соответствии с приведенными особенностями процедур интерпретации выделим три большие класса ЭС при функционировании вычислительного комплекса КМ на основе следующих определений (рис. 2).



Рис. 2. Формализации процесса моделирования и интерпретации решений в среде КМ

**Определение 4.** Замкнутые среды в моделях КМ допускают конечное исчерпывающее описание поведения исследуемых феноменов. Это поведение может быть детерминированным или вероятностным в зависимости от принятого описания интерпретируемой среды. При этом управляющий модуль системы ИП использует полные знания о среде взаимодействия и ее свойствах. Исходной информацией при формировании процедур КМ являются данные измерений и моделирования в виде динамических характеристик взаимодействия. Таким образом, замкнутые среды моделей КМ позволяют получить исчерпывающие знания о динамике взаимодействия (в детерминистском или статистическом смысле) для практического использования в процессе обучения.

**Определение 5.** Открытые среды не представляют возможности исчерпывающего математического описания в процедурах КМ. Знания об их «скрытых» свойствах и динамических характеристиках в таких средах могут накапливаться

в процессе функционирования системы ИП, однако при этом не достигается полный уровень описания. Открытый мир, характеризуемый подобной средой взаимодействия в приложениях КМ, может быть как детерминированным так и не детерминированным. Но в любом случае полное знание о процессах взаимодействия не может быть представлено в виде неизменного окончательного математического описания.

**Определение 6.** Трансформируемые среды, в отличие от предыдущих сред в задачах КМ, могут менять свое поведение. Динамические характеристики и реакции на управляющие воздействия системы ИП определяются в зависимости от тех действий, которые отдельные «скрытые» объекты совершают при интерпретации на основе процедур КМ. Знания о динамике взаимодействия и математическом описании трансформируемой среды в моделях КМ носят временной «исторический» характер.

Если ввести понятие состояния интерпретирующей среды КМ, характеризуя его как исчерпывающий набор «скрытых» знаний о ее свойствах и особенностях поведения МДО, то замкнутые среды, используемые в пространствах поведения и управления современной теории катастроф, могут задаваться одним состоянием взаимодействия. Состояния моделей КМ при интерпретации в открытых средах будут фиксироваться на некоторых «временных» интервалах. Открытая среда может рассматриваться как замкнутая, а смена состояний в процессе эволюции будет происходить за счет появления новых «скрытых» знаний о среде взаимодействия и способах управления, которые изменяют прежние закономерности поведения МДО, верные для ранее фиксированного состояния. В трансформируемых средах процедуры интерпретации на основе моделей КМ выполняются с учетом смены состояний, которые могут планироваться и инициироваться в зависимости от особенностей эволюционной динамики системы взаимодействия.

Формирование структуры данных вычислительной среды КМ при моделировании динамических ситуаций в процессе обучения реализуется в направлении перестройки организации информации в мультипроцессорной вычислительной среде. Процесс перестройки в условиях эволюции сопровождается *фазовым переходом*, в результате которого отмечается качественный скачок в изменении элементов интерпретируемой системы, причем последовательность перестройки осуществляется в виде цепочки преобразования информации [7]:

$$F(SA) \rightarrow Fluct \rightarrow Bifurc \rightarrow Reorg \rightarrow F(NSA), (2)$$

где  $F(SA)$  – функционирование системы в области притяжения исходной структуры-аттрактора; *Fluct* – отклонения (флуктуации); *Bifurc* – бифуркация; *Reorg* – реорганизация (фазовый переход);  $F(NSA)$  – функционирование в области новой структуры-аттрактора.

Интерпретация динамики взаимодействия в вычислительной среде КМ осуществляется в рамках структуры, представленной фрактальным графом [8]:

$$G(F_R) = (V(E,U), A(E,C)), (3)$$

формализующим *события*  $(V(E,U))$ , описывающие действия в среде КМ, и *условия*  $A(E,C)$  – в виде логического описания ее состояния (рис. 3).

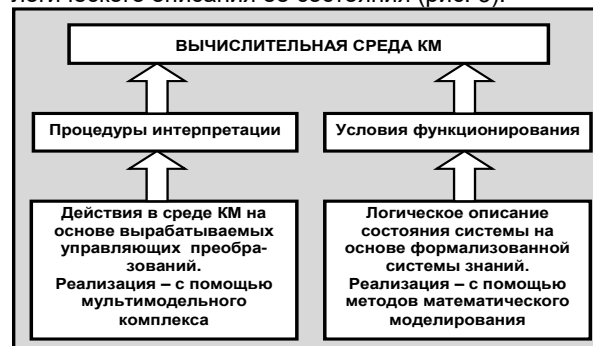


Рис.3. Структурный синтез вычислительной среды КМ

Как следует из этого представления, управляющий модуль вычислительного комплекса КМ обеспечивает обработку потока информации, связанного с состояниями среды взаимодействия и условиями ее описания в процессе интерактивного диалога.

Преимущества предлагаемого подхода к построению формального аппарата ИП в вычислительной среде КМ заключаются в возможности геометрической и аналитической интерпретации динамики эволюционирующих систем в рамках современной теории катастроф [5], позволяющей представить исследуемый процесс в виде простых геометрических образов фрактального отображения динамических ситуаций.

### 3. Особенности структуры ИОС

В рамках представленной концептуальной модели обучения формализуются процессы структурной и функциональной конфигурации вычислительной среды КМ на основе аппарата знаний НФС, организованной на базе синергетической теории управления [7],[8], и когнитивной парадигмы [1].

Студент, как будущий оператор системы поддержки принятия решений (ППР) по созданию новой техники и технологий – специалист необычного профиля, профессиональная деятельность которого отличается тем, что принимать решения ему придется в сложных ситуациях в условиях неопределенности, а часто и дефицита времени. Именно поэтому курс КМ призван обеспечить процедуры ППР необходимым аппаратом знаний, определяющим содержание лекционного курса. Структура проблемной лекции при чтении курса «Компьютерная математика: прикладные аспекты» представлена на рис.4, где дается содержательная интерпретация последовательности приобретения знаний при интерактивном взаимодействии с аудиторией.

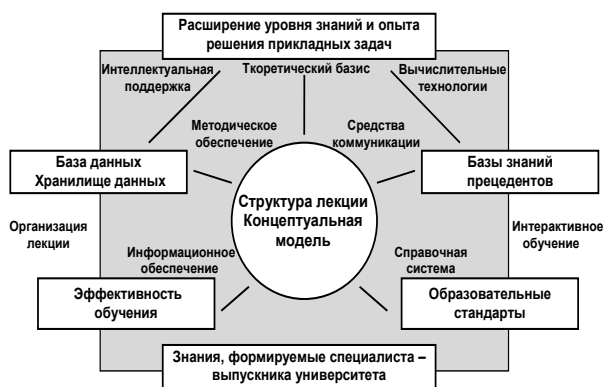


Рис.4. Концептуальная модель, определяющая структуру проблемной лекции

В процессе диалога с аудиторией сначала представляется теоретический базис изучаемой проблемы, на основе которого ведется постановка и обсуждение предлагаемых решений с использованием ИП программного комплекса моделирования и визуализации динамических ситуаций. Для обеспечения современного уровня интерактивного взаимодействия используются принципы человеко-машинного обучения на базе аппарата знаний, построенного в рамках современных интеллектуальных технологий и высокопроизводительных вычислений [5] – [8].

Следует отметить, что «искусству задавать вопросы» в процессе диалога с аудиторией научиться труднее, чем «искусству получать ответы». Как говорят специалисты по машинному обучению, исходный текст вопросно-ответной парадигмы содержит только 10% информации, а 90% определяется контекстом, который мы привносим, воспринимаемая сообщение.

Междисциплинарность подхода существенно обогащает контекст, в котором реализуется механизм взаимодействия с аудиторией. Во все времена междисциплинарность опиралась на прочный естественнонаучный фундамент, на использование достижений математики как основы процесса обучения. Среди фундаментальных результатов, используемых при построении курса КМ, следует выделить концепцию минимальной длины описания А.Н.Колмогорова [2], принцип нелинейной диссипации Н.Н.Моисеева [4] и методы решения некорректных (обратных) задач А.Н.Тихонова [11].

Одним из важных направлений в программном комплексе ИП является моделирование процесса оптимизации последовательных программ вычислительного комплекса КМ при организации структурированного диалога в процессе изучения курса. Рассматриваемая модель состоит из двух частей.

Первая часть модели содержит термины для описания объекта структуризации и оптимизации. К ним относятся термины для описания вычислительной среды КМ (термины ситуации) и термины для описания языка (термины знаний).

Вторая часть определяет термины, позволяющие описать процесс оптимизации программной среды обучения. Эти термины разбиваются на следующие группы:

- термины, определяющие настройку модели процесса взаимодействия на модель объекта оптимизации, при помощи которых описываются отношения между фрагментами программы;

- термины для описания результатов выполнения преобразований на каждом шаге оптимизации (термины для описания ситуаций предметной области и свойств оптимизируемых преобразований);

- термины для описания параметров процесса оптимизации (описание порядка и стратегии применения оптимизирующих преобразований при исследовании результатов их применения к программам разных классов).

Алгоритмы решения задачи моделирования процесса оптимизации реализуются при формализации знаний оптимизации вычислительной среды КМ. Функционирование системы обеспечивается с помощью транслятора, преобразующего структурированную программу на языке высокого уровня в модель структурной программы, которая является внутренней формой реляционного представления программ. На базе модели структурной программы осуществляется логический вывод и строится протокол использования системы оптимизации. Протокол поступает в подсистему оценки и визуализации, обеспечивающей анализ оптимальности программы при помощи заданной оценочной функции.

Таким образом, используемый подход при построении диалога с аудиторией является удобным и эффективным инструментом познания методов и средств КМ, особенно в плохо формализуемых средах. Современные системы ИП, использующие указанные выше принципы организации учебного процесса для моделирования и визуализации структуры предметной области – это реальная альтернатива системам «черного ящика». При этом наиболее важной характеристикой является процесс объяснения неявных знаний и превращение их в наглядные познавательные структуры.

Архитектурно-структурная организация программного комплекса КМ сочетает в себе достоинства интеллектуальных систем (ИС) новых поколений, в совокупности обеспечивая наиболее существенные признаки взаимодействия:

- адаптивность под уровень знаний (профессиональная квалификация обучаемых),
- возможность получения аргументированной аналитической информации для обоснованного решения поставленных задач.

Такая организация программного комплекса КМ позволяет обеспечить качественно новые возможности развитию информационных технологий в рассматриваемой наукоемкой отрасли практической деятельности, и прежде всего при принятии управленческих решений в сложных предметных областях, связанных с подготовкой специалистов по созданию инновационных решений по проектированию новых типов МДО – судов и плавучих технических средств освоения.

#### 4. Особенности теоретической базы КМ

Цель создания теоретической базы КМ заключается в разработке научно-методического аппарата, обеспечивающего компьютерную интерпретацию современных методов и средств ИП. Для достижения указанной цели в предлагаемом

курсе лекций рассматриваются следующие задачи (рис.5):

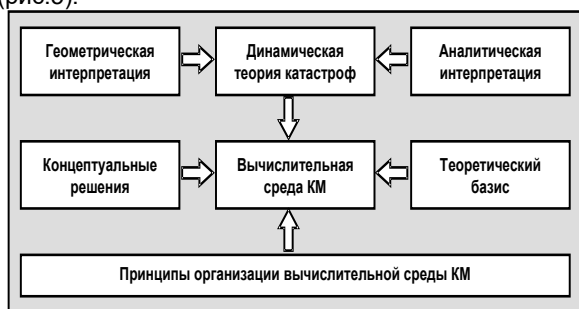


Рис. 5. Информационная среда КМ

- синтез моделей КМ на основе интеллектуальных технологий;
- методология агрегирования моделей КМ в рамках динамической теории катастроф;
- функциональное представление эволюционной динамики интерпретируемых систем.

Концептуальная модель информационной среды КМ рассматривается как совокупность взаимосвязанных компонент:

- развивающееся множество интерпретирующих задач дискретной математики;
- геометрические отображения и формальные структуры, описывающие распределение задач в динамической ЭС;
- область функциональной корректности на множестве состояний интерпретирующей системы в виде упорядоченной последовательности решения;
- множество маршрутов, по которым перемещаются исходные данные и результаты расчета вычислительных элементов КМ.

Главной задачей этих взаимосвязанных компонент вычислительной среды КМ является обеспечение управления распределенными вычислениями в режиме УС.

Таким образом, построение курса КМ определяется как задача ИП распределенных вычислений, обеспечивающей на интервале реализации предоставление требуемого вычислительного ресурса с необходимым уровнем корректности алгоритмического обеспечения.

**Определение 7.** Функциональный анализ информационной среды моделирования обеспечивает ИП в пространстве знаний КМ (рис. 6).

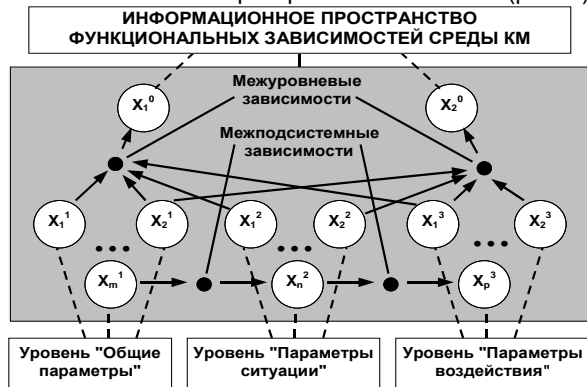


Рис. 6. Информационное пространство среды КМ

В системе ИП для исходного момента времени  $t_0$  выделяется множество необходимых задач  $p(t_0)$  и множество их функций  $Cet(t_0)$ :

$$Cet(t_0) = \bigcup_{P(t_0)} C_i, \quad (4)$$

т.е. полное множество задач  $Cet(t_0)$  разбивается на классы  $C_i$  в соответствии с их назначением и особенностями интерпретирующей системы.

При построении логических моделей знаний в вычислительном комплексе КМ определяется структура множеств из объектов информационной среды, отображающей эти множества.

### 5. Методы повышения эффективности процесса обучения в среде КМ

Создание процедур и различных подходов к выбору предпочтительного варианта решения из множества альтернатив в среде КМ реализуется на основе методов поиска решений. Анализ показал, что наиболее предпочтительным вариантом построения системы ППР является использование методов повышения эффективности процесса обучения на основе когнитивной парадигмы, метода Делфи и мозгового штурма [8].

#### Использование когнитивной парадигмы.

Одной из эффективных стратегий повышения эффективности процедур обучения является использование методов когнитивной компьютерной графики (ККГ) [1],[8]. ККГ-система основана на визуализации всех этапов осмысления предлагаемой информации в процессе генерации и анализа решений, ее количественного системного анализа и порождения нового, как правило, нестандартного знания. В результате использования ККГ-системы:

- существенно активизируется процесс взаимодействия, который превращается в увлекательное соревнование индивидуальных интеллектов и профессионального опыта;
- визуализируются в максимально наглядной форме количественные оценки субъективных мнений обучаемого;
- повышается обоснованность суждений с помощью методов математического моделирования и вычислительного эксперимента;
- делается явным и доступным коллективному обозрению и обсуждению те закономерности, которые особенно важны для успешного решения проблемы, но обычно остаются «за кадром» традиционных процедур экспертного оценивания;
- осуществляется обучение и обострение интуиции обучаемых и преподавателя как лица, принимающего решение (ЛПР), в процессе совместной работы с визуализированным смыслом данной проблемы с целью конструирования новых решений.

Эвристические правила обработки, анализа и интерпретации ККГ-визуализированной информации выявляются и формулируются в процессе работы коллектива студентов. Эти правила являются важным результатом функционирования ККГ-системы и составляют основу для разработки подсистемы обучения и обострения интуиции обучаемых и ЛПР.

Таким образом, ККГ-система помогает обучаемому структурировать проблему, построить

оптимальное описание объектов, уточнить формулировку цели и ее содержательное понимание, уточнить реализацию предлагаемых решений.

**Метод Делфи.** В задачах анализа предлагаемых решений, особенно в сложных ситуациях, когда имеющихся данных оказывается недостаточно для принятия обоснованного выбора, может оказаться полезным метод Делфи (Delphi Technique) [8]. Этот метод особенно эффективен при агрегировании знаний в случае большого разброса исходных оценок. При практической реализации в среде КМ метод Делфи дополняется различными статистическими процедурами и критериями, позволяющими улучшать окончательную оценку решения с учетом трудности решаемой задачи, уровня знаний обучаемых и степени согласованности их мнений.

В методе Делфи полученные субъективные вероятности доводятся до сведения всех участников, проанализировав которые, обучаемые вновь сообщают свои откорректированные оценки. Используемая итеративная процедура позволяет в конечном счете сблизить оценки обучаемых и получить некоторую общую оценку, принимаемую за агрегированную. Как показывает практика, метод Делфи эффективен при большой неопределенности исследуемой ситуации.

**Метод мозгового штурма.** «Мозговой штурм» или «мозговая атака» - один из распространенных методов активизации творческого мышления, особенно при генерации новых технических решений, не имеющих аналогов в практике судостроения [8]. Основная идея штурма – это отделение процедуры генерирования идей в группе обучаемых от процесса анализа и оценки высказанных идей.

Процедура штурма осуществляется преподавателем, при этом обучаемым предлагается высказывать любые даже самые фантастичные идеи по разрабатываемому техническому решению. Самый интересный момент штурма – это наступление «пика», когда происходит непроизвольная генерация гипотез и предлагаемых решений. Оценка результатов «штурма» выполняется преподавателем с привлечением независимого эксперта.

Одной из основных трудностей применения рассмотренных моделей повышения эффективности обучения на основе методов Делфи и мозгового штурма является представление суждений в виде числовых значений на некоторой шкале. Важное требование при разработке таких моделей состоит в том, чтобы предлагаемая модель давала близкие результаты при небольших отклонениях в числовом представлении суждений.

### Заключение

Таким образом, реализация нового подхода к построению курса КМ открывает возможности формирования АОС и процедур ИП процесса обучения на основе обработки информации в режиме УС на базе интегрированных моделей. Эти модели сочетают достижения интеллектуальных технологий и высокопроизводительных вычислений применительно к рассматриваемой области знаний. Разработанный подход к построению курса КМ позволяет активизировать процесс обучения с использованием эффективных процедур ИП и средств интерактивного взаимодействия – когнитивной парадигмы и методов Делфи и мозгового штурма.

### Литература

6. Зенкин, А.А. Когнитивная компьютерная графика / А. А. Зенкин. – М.: Наука, 1991. – 192 с.
7. Колмогоров, А.Н. Избранные труды в 6-ти томах / А. Н. Колмогоров. – М.: Наука, 2005. – 304 с.
8. Кук, Д. Компьютерная математика / Д. Кук, Г. Бейс. – М.: Наука. 1990. – 384 с.
9. Моисеев, Н. Н. Избранные труды / Н. Н. Моисеев. – М. Тайрекс Ко. 2003. т.1 – 376 с., т.2 – 264 с.
10. Нечаев, Ю. И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений: монография / Ю. И. Нечаев. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. – 392 с.
11. Нечаев, Ю. И., Непотопляемость судов: подход на основе современной теории катастроф: монография / Ю. И. Нечаев, О. Н. Петров. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2014. – 368 с.
12. Нечаев, Ю. И. Топология нелинейных нестационарных систем: теория и приложения: монография / Ю. И. Нечаев. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2015. – 332 с.
13. Нечаев, Ю. И. Интеллектуальные технологии в системе исследовательского проектирования / Ю. И. Нечаев. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2017. – 320 с.
14. Новиков, Д. А., Курс теории активных систем / Д. А. Новиков, С. Н. Петраков. – М.: СИНЕГ, 1999. – 104 с.
15. Солодовников, В. В. Теория сложности и проектирование систем управления / В. В. Солодовников, В. И. Тумаркин. — М.: Наука, 1990. – 341 с.
16. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М.: Наука, 1986. – 285 с.
17. Foster, I. Cloud Computing and Grid Computing 360-Degree Compared / I. Foster, Y. Zhao, I. Raicu, S. Lu // eprint arXiv:0901.0131, 2008 [Электронный ресурс]: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0901/0901.0131.pdf>
18. Lublinsky, B. Defining SOA as an architectural style / B. Lublinsky. – 9 January 2007. [Электронный ресурс]: <http://www.ibm.com/developerworks/architecture/library/ar-soastyle/>
19. Urgent Computing Workshop 2007 [Электронный ресурс] // Argonne National Lab, University of Chicago. – April 25-26, 2007. – Режим доступа: <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.
20. Zadeh, L. Fuzzy logic, neural networks and soft computing / L. Zadeh // Commutation on the ASM-1994. V.37. №3, p.p.77–84.

### References

1. Zenkin A.A. Kognitivnaya computernaya graphika [Cognitive computer graphic]. Moscow, Science Publ, 1991.
2. Kolmogorov A.N. Isbrannyye trudy v 6 tomax [The selected works in 6 volumes]. Moscow, Science Publ, 2005.

3. Cook D, Bez H. Kompjuternaja of the mathematician [Computer mathematics]. Moscow, Science Publ. 1990.
4. Moiseyev N. N. Izbrannyye trudy [The selected works]. Moscow, Tyreks Co. 2003, V.1, V.2.
5. Nechaev Yu. I. Teoriya katastrof: sovremenny podkhod pri prinyatii resheniy: monografiya [Catastrophe theory: the modern approach to decision-making]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ., 2011.
6. Nechaev Yu. I., Petrov O. N. Nepotplyaemost' sudov: podkhod na osnove sovremennoy teorii katastrof: monografiya [Ship unsinkability: an approach on the basis of modern catastrophe theory]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ., 2014.
7. Nechaev Yu. I. Topologiya nelineynykh nestatsionarnykh sistem: teoriya i prilozheniya: monografiya [Topology of nonlinear non-stationary system: theory and application]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ., 2015.
8. Nechaev Yu. I. Intel'ktual'nyye tekhnologii v sisteme issledovatel'skogo proyektirovaniya [Intellectual technologies in systems of research design]. St.-Petersburg: Art-Express Publ, 2017.
9. Novikov D. A., Petrakov S. N. Kurs teorii aktivnykh sistem Novikov [Course of the theory of active systems]. Moscow, SINEG Publ., 1999.
10. Solodovnikov V. V., Tumarkin V. I. Teoriya slozhnosti i proyektirovaniye sistem upravleniya [The theory of complexity and designing of control systems]. Moscow, Science Publ, 1990.
11. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya. Metody resheniya nekorrektnykh zadach [Methods of solving of incorrect problems]. Moscow, Science Publ, 1986.
12. Foster I., Zhao Y., Raicu I., Lu S. Cloud Computing and Grid Computing 360-Degree Compared // eprint arXiv:0901.0131, 2008 [Электронный ресурс]: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0901/0901.0131.pdf>
13. Lublinsky B. Defining SOA as an architectural style. 9 January 2007. [Электронный ресурс]: <http://www.ibm.com/developerworks/architecture/library/ar-soastyle/>
14. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago. April 25-26, 2007. <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>
15. Zadeh L. Fuzzy logic, neural networks and soft computing. Commutation on the ASM-1994. Vol.37. #3, p.p.77–84.



УДК 004.942:004.031.043

## МУЛЬТИМОДЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС КОМПЬЮТЕРНОЙ МАТЕМАТИКИ: ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ПРИОБРЕТЕНИЯ ЗНАНИЙ

**Юрий Иванович Нечаев**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и информационных технологий

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, Лоцманская, 3  
e-mail: petr\_oleg@mail.ru

### Аннотация

Рассматриваются особенности формирования мультимодельной среды, обеспечивающей интеллектуальную поддержку принятия решений при контроле критических ситуаций. На каждом иерархическом уровне вводится описание последовательности операций в терминах пространств состояний и ситуаций. Пространство состояний критической ситуации включает в себя тип и число переменных и параметров состояния, функцию отображения, а также описание состояний, соответствующих данному уровню иерархии. Пространство ситуации системы взаимодействия определяет множество элементов на данном уровне иерархии, характеризующееся параметрами критической ситуации и особенностями динамики взаимодействия при заданном уровне внешних возмущений. Математическое описание динамики взаимодействия включает множество допустимых входов и допустимых выходов, множество состояний, функцию перехода и функцию выхода. Преобразование арифметических выражений интегрированного ММК ориентировано на обработку произвольных комбинаций арифметических операций и последующего построения необходимого математического выражения в виде дерева интеллектуальной поддержки решений. Контроль режимов движения МДО на интервале реализации поддерживает моделирование и визуализацию сложных динамических картин взаимодействия при различном уровне внешних возмущений. Оценка эффективности генерируемых решений реализуется с использованием функции управления, зависящей от вектора параметров и вектора состояния среды в текущей ситуации.

**Ключевые слова:** компьютерная математика, мультимодельная среда, пространство состояний, пространство ситуации, многорежимное управление, эффективность решений.

## MULTIMODEL COMPLEX COMPUTER MATHEMATICS: INTELLECTUAL SUPPORT OF THEORETICAL DECISIONS IN THE PROCESS OF ACQUISITION OF KNOWLEDGE

**Yuri I. Nechaev**

Dr.Sci.Tech, Professor, Professor of the Department of Computing Engineering and Information Technologies  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: petr\_oleg@mail.ru

### Abstract

The features of generation of a multi-model environment that provides intellectual decision-making support in the control of critical situations are addressed herein. At each hierarchical level, a description of the sequence of operations is introduced in terms of state of spaces and situations. The state of space of a critical situation includes the type and number of variables and state parameters, a display function, and a description of the states corresponding to a given level of hierarchy. The space of a situation of an interaction system determines the set of elements at a given level of the hierarchy, characterized by the parameters of the critical situation and the features of the dynamics of interaction for a given level of external disturbances. The mathematical description of the interaction dynamics includes sets of permissible inputs and permissible outputs, sets of states, a transition function and an exit function. The transformation of the arithmetic expressions of the integrated multimodel complex is oriented to the processing of arbitrary combinations of arithmetic operations and the subsequent formulation of the required mathematical expression in the form of a tree of intelligent decision support. The monitoring of the motion modes of a marine dynamic object in the implementation interval supports simulation and visualization of complex dynamic interaction patterns under different levels of external disturbances. Evaluation of the effectiveness of the generated solutions is implemented using the control function depending on the parameter vector and the state of the environment vector in the current situation.

**Keywords :** computer mathematics, multi-model environment, state of space, situation space, multi-mode control, decision efficiency.

**Введение**

Теоретическая база создания курса «Компьютерная математика: прикладные аспекты» формируется на основе эффективного сочетания накопленной системы знаний в области классической математики с новыми подходами и парадигмами искусственного интеллекта (ИИ) [1]–[11]. Повышение достоверности оценки и прогноза теоретических решений достигается с использованием парадигмы обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде в соответствии со следующими утверждениями:

**Утверждение 1.** Анализ альтернатив и принятие решений в прикладных задачах осуществляется с использованием критериев, определяющих приоритетность решения на основе функциональных соотношений модели выбора.

**Утверждение 2.** Реализация конкурирующих вычислительных технологий при интерпретации решений в условиях априорной неопределенности обеспечивается на основе нечеткой формальной системы (НФС) с учетом особенностей исследуемой ситуации.

**Утверждение 3.** Оценка полезности решения в информационной среде «задача – решение – критерий» определяется путем формирования правил выбора, определяющих отличие полученного решения от желаемого с учетом системы предпочтений приоритетности решения.

Реализация утверждений 1 – 3 дает возможность повысить эффективность принимаемых решений путем распараллеливания и реализации алгоритмов на высокопроизводительных вычислительных платформах. Проверка корректности алгоритмов осуществляется формальным путем на основе общих требований к алгоритмическому обеспечению системы. Применительно к параллельным алгоритмам понятие корректности связано со специфическими свойствами таких алгоритмов: непротиворечивостью, устойчивостью и согласованностью [5] – [8].

**1. Мультимодельный комплекс (ММК) интерпретации решений**

Информационная среда моделирования динамики взаимодействия МДО с внешней средой открывает возможности создания ММК интерпретации критических ситуаций [7] (рис.1). Мультимодельная среда, обеспечивающая контроль критической ситуации, представляет собой иерархическую структуру. Информация, поступающая на каждый иерархический уровень с нижнего яруса, суммируется и определяет состояние системы оперативного контроля в процессе эволюции среды взаимодействия. Высшие иерархические уровни характеризуются возрастающей долей участия элементов восходящего порядка в формировании алгоритмов оценки поведения МДО и генерации управляющих воздействий.

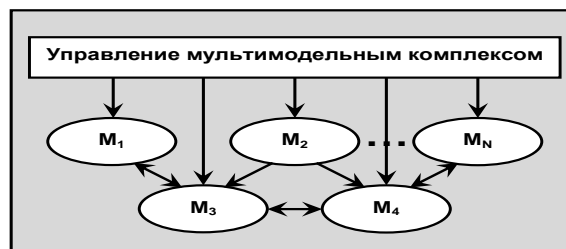


Рис.1. Иерархическая среда управления ММК

На каждом иерархическом уровне вводится описание последовательности операций в терминах пространств состояний и ситуаций в соответствии со следующими определениями:

**Определение 1.** Пространство состояний  $X$  критической ситуации включает в себя тип и число переменных и параметров состояния  $\Omega$ , функцию отображения  $f: X \times \Omega \rightarrow R$ , а также описание состояний, соответствующих данному уровню иерархии.

**Определение 2.** Пространство ситуации системы взаимодействия – множество элементов на данном уровне иерархии, характеризующееся параметрами критической ситуации и особенностями динамики взаимодействия при заданном уровне внешних возмущений.

**Определение 3.** Математическое описание динамики взаимодействия с фиксированным пространством ситуаций включает следующие компоненты: множество допустимых входов  $U$ , множество допустимых выходов  $Y$ , множество состояний  $Q$  (пространство ситуаций), функцию перехода  $\lambda: Q \times U \rightarrow Q$  и функцию выхода  $\gamma: Q \times U \rightarrow Y$ .

Приведенные определения позволяют сформулировать модель интерпретации поведения МДО в критической ситуации на основе динамической теории катастроф:

Совершенствование теоретической базы программного комплекса КМ потребовало перестройки имеющихся методов и алгоритмов анализа текущих ситуаций в условиях ограниченности временных интервалов и исходной информации. Алгоритмы решения реализуются на основе концепции минимальной длины описания А.Н.Колмогорова [2] и теории сложности [9].

Формирование иерархии моделей интегрированной системы комплекса осуществляется с помощью стандартных оснований декомпозиции. На любом уровне иерархии выделяются подсистемы и взаимосвязи между ними. Формально модель подсистемы можно описать следующим образом:

$$M(S_i) = \langle C(S_i), \{V_j(S_i)\} \rangle, \quad (1)$$

где  $C(S_i)$  – описание класса подсистемы  $S_i$ ;  $\{V_j(S_i)\}$  – множество вариантов подсистем  $S_i$ .

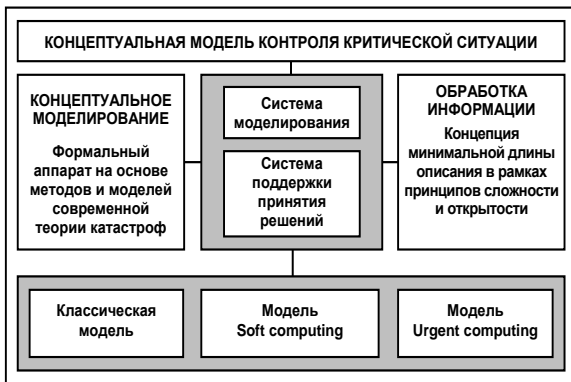


Рис.2. Мультимодельная среда интерпретации поведения МДО в критической ситуации

Описание класса  $C(S_i)$  содержит следующие компоненты:

$$C = \{ \{x_k, t_k, D_k\}, G, F \}, \quad (2)$$

где  $x_k$  – идентификатор атрибута;  $t_k$  – тип атрибута;  $D_k$  – домен атрибута;  $G = \{g_k\}$  – множество зависимостей между атрибутами;  $F$  – множество методов.

Преобразование арифметических выражений интегрированного ММК ориентировано на обработку произвольных комбинаций арифметических операций и последующего построения необходимого математического выражения в виде дерева интеллектуальной поддержки решений. Корнем дерева является результат сформированного математического выражения, используемого в заданной ситуации.

При построении дерева на первой итерации все исходные данные математической операции разбиваются на пары и для каждой пары вычисляются их значения. Далее все полученные значения пар также разбиваются на пары и снова выполняется вычисления для выделенных пар.

Логический вывод НФС при поиске моделей интеллектуальной поддержки состоит из последовательности шагов.

- на первом шаге на основе текущей информации производится отбор подходящих классов моделей. Критерием отбора служат условия задачи и диапазоны изменения заданных характеристик;

- на втором шаге для выделенных классов моделей рассчитываются значения экспертных оценок, устанавливается конкретная модель и соответствующие признаки;

- третий шаг – вывод заключения с формулировкой характеристики модели, ее пригодности для решения поставленной задачи и диапазона погрешностей, который устанавливается на основе критериев, определяющих интервальные значения экспертных оценок.

На рис.3 представлена обобщенная структура дерева интеллектуальной поддержки, обеспечивающая процедуры интерпретации эволюционной динамики сложных систем. Ветви дерева отображают следующие решения: 1 и 2 – функции интерпретации множеств поведения и управления динамической теории катастроф; (3 – 6) – конкурирующие вычислительные технологии при выборе предпочтительного решения в задачах идентификации, аппроксимации, прогноза и

выработки управляющих решений; (7 – 14) – нечеткие алгоритмы многокритериальной оптимизации (7); нейросетевые алгоритмы идентификации (8), аппроксимации (9) и прогноза (10), генерации решений (11); анализа альтернатив (12) нейрорезолюционные алгоритмы интерпретации решений (13) и графического отображения результатов (14) в сложной динамической среде.

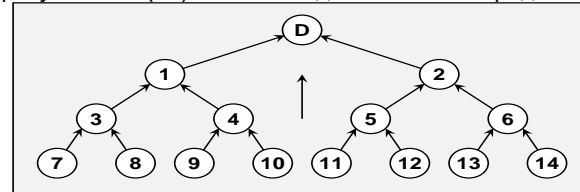


Рис.3. Общая модель дерева решений при интеллектуальной поддержке процедур эволюционной динамики

Помимо указанных решений с помощью предложенной модели можно структурировать алгоритмы эволюционной динамики многорежимного принципа управления, включая эволюционное, когнитивное и символическое моделирование, а также алгоритмы процессов адаптации и самоорганизации при возникновении «потенциальной ямы» и при построении диаграммы переходов состояний МДО. Обработка вычислительных операций исходного математического выражения на основе дерева решений заключается в определении необходимого числа проходов и выполнении каждой операции.

Таким образом, приведенная структура представляет собой информационный граф математического выражения с операционными и информационными вершинами и дугами, определяющими поток данных. Для синхронизации потока данных в информационном графе на этапе трансляции параллельной программы выполняется расчет временной задержки для каждого канала памяти путем суммирования алгоритмической и синхронизационной задержек.

Такое представление дает возможность рассматривать ММК как иерархическую систему интеллектуальной поддержки при контроле поведения МДО. Принцип необходимой иерархии в рассматриваемом приложении формулируется следующим образом: чем меньше формализованы зависимости управляющих воздействий от возмущений среды или состояния объектов управления и чем больше неопределенность при принятии решений, тем более высокая иерархия необходима для управления.

Из этого принципа следует, что недостаточные возможности управления могут быть компенсированы с помощью построения управленческих решений как иерархически структурированного программного комплекса КМ.

Алгоритм поиска оптимальной иерархии [1] состоит в выполнении процедуры автоматической кластеризации при определении на заданном конечном множестве объектов  $E \in R^m$  такого разбиения  $E$ , чтобы одни классы включали в себя другие. Рассмотрим дихотомические иерархии, определенные на  $E$  и оптимальные при минимальной сумме всех составляющих. Дихотомическая

иерархия определяет множество  $H$ , состоящее из подмножеств  $E$  при условии:

$$\begin{aligned} 1) \forall x \in E, \{x\} \in H, E \in H; \\ 2) \forall B \in H, \forall \tilde{B} \in H B \cap \tilde{B} = \{\phi, B, \tilde{B}\}; \\ 3) \forall B \in H \text{ card } B > 1 \Rightarrow \\ \exists (\tilde{B}, B^*) \in H \times H : \tilde{B} \neq B^* \text{ и } \tilde{B} \cup B^* = B. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь первые два условия определяют иерархию, а третье – условие ее дихотомичности.

Описание используемых моделей взаимодействия в рамках иерархической структуры достигается с помощью формализации понятий (функций интерпретации), связанных между собой различного рода отношениями. Понятия организованы в иерархии, связи внутри которых структурированы таким образом, чтобы построить управление процессом обработки информации на основе НФС. Концепция иерархии управляемых моделей на основе принципа минимальной длины описания [2] позволяет выделить единую «базовую» модель, обеспечивающую построение реалистичных описаний контролируемых процессов, формировать новые обобщения и нетривиальные подходы к анализу сложных систем. Число переменных и диапазон их изменения в ММК достаточно велики, а сами переменные могут быть качественными и количественными. При этом их взаимозависимости слабо формализованы и изменяются с течением времени.

Предположения, принятые при построении абстрактно-функционального метода отношений в пространстве интерпретации критических ситуаций на основе ММК можно выразить в виде следующих определений, связывающих функции и методы интерпретации МДО [8].

**Определение 4.** Функция и методы, выделенные при исследовании поведения МДО в критической ситуации, могут быть заданы в явном виде;

**Определение 5.** Если некоторой функции сопоставлен метод исследования, то это означает, что данный метод полностью реализует функцию интерпретации;

**Определение 6.** Если функции интерпретации сопоставлены несколько методов, то это означает, что функция может быть реализована каждым из этих методов (альтернативные методы);

**Определение 7.** Если методу исследования поведения МДО сопоставлены несколько функций интерпретации, то это означает, что этот метод реализует каждую из выделенных функций (полифункциональность).

Выразительность теории ММК интерпретации критических ситуаций определяется совокупностью понятий (термов), которые могут быть выражены из ядра этой теории:

Процедуры принятия решений направлены на выбор значений вектора управляемых переменных в области поиска  $Z \in D_z$  так, чтобы удовлетворить условиям выбора. Область пространства управляемых переменных, в которых выполняются все наложенные условия, называют *областью работоспособности*  $D_R$ , а множество  $D = D_z \cap D_R$  – *областью допустимых решений*.

В множестве  $D$  выделяют выпуклые  $D^*$  и невыпуклые  $D^{**}$  подмножества при условии:

$$D^* = D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_k;$$

$$D^{**} = D_1 \cap D_2 \cap \dots \cap D_k. \quad (4)$$

Область принятия решения разбивается на два подмножества:  $D = D_1 \cup D_2$ , где в подмножество  $D_1$  включено отображение по заданному критерию варианта решений, а в  $D_2$  – все отклоненные варианты, причем  $D_1 \cap D_2 \neq \emptyset$ . Критерий оптимальности представляет собой отображение на множестве допустимых решений

$$Q := M_1 \rightarrow R^+, \quad (5)$$

где  $R^+$  – множество неотрицательных вещественных чисел.

Функция  $Q$  позволяет реализовать процедуру сравнения вариантов решения  $m' \in M'$ , если

$$Q(m') = \min Q'(m'), m' \in M'. \quad (6)$$

Оптимизационная задача  $\langle M, D, Q \rangle$  содержит  $M$  – пространство решений,  $D$  – ограничения в  $M$  допустимой области

$$M' \subseteq D, Q: M' \rightarrow R^+ \quad (7)$$

с критерием оптимальности  $Q$ .

Таким образом, классификацию математических моделей в программном комплексе КМ проводят по элементам модели и зависимости, описываемой целевую функцию, ограничения и граничные условия.

## 2. Контроль режимов движения МДО на интервале реализации

Функциональные элементы программного комплекса КМ обеспечивают взаимосвязь с ИС рассматриваемых приложений (рис. 4), которые интегрируются в рамках виртуальной программной среды и поддерживают моделирование и визуализацию сложных динамических картин взаимодействия при различном уровне внешних возмущений. Особенность виртуальной среды состоит в интеграции математического описания сложного взаимодействия в условиях многорежимного принципа управления. Структура используемых моделей интерпретации эволюционной динамики представляет собой отображение  $f: U \rightarrow U^*$  интегрированной модели контроля текущей ситуации.

**Определение 8.** Отображение  $f$  представляется в виде направленного множества:

$$U(t_0, t_k) \Rightarrow U^*(R_1, R_2, R_3) [f_t \in \Omega] \quad (8)$$

где  $U(t_0, t_k)$  – управление на интервале реализации;  $U^*(R_1, R_2, R_3)$  – функция интерпретации режимов функционирования МДО, формирующая управление в зависимости от сложности и неопределенности контролируемой ситуации;  $\Omega$  – область допустимых значений параметров взаимодействия.

**Определение 9.** Функции интерпретации для выделенных режимов  $R_1, R_2, R_3$  определяется короткожем:

$$\begin{aligned} U^*(R_1, R_2, R_3) = \langle U_1(ST, MF, ANN), \\ U_2(ST, NF, E(ANN)), U_3(PR) \rangle, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $U_1(\bullet)$ ,  $U_2(\bullet)$ ,  $U_3(\bullet)$  – структуры управления, реализующие конкурирующие вычислительные технологии на основе стандартной  $ST$ , нечеткой (матрица  $MF$ ), нейросетевой  $ANN$ , нейронечеткой  $NF$ ,

нейросетевого ансамбля E(ANN) и модели вывода по прецеденту PR.

На основе выражений (8),(9) осуществляется построение системы контроля поведения МДО. В зависимости от особенностей взаимодействия, определяемых выделенными режимами движения, используются различные структуры системы [66],[68]. Наиболее простая структура реализована на базе нечеткой модели с коррекцией правил. Система включает в себя блоки предварительной обработки информации (вычислительный блок, блок анализа ситуации и блок сравнения) и блок адаптации на основе матрицы нечетких логических правил и нейросетевых моделей.

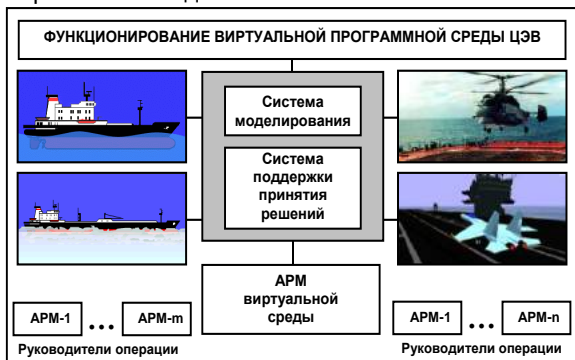


Рис. 4. Моделирование ситуации при интерпретации динамики взаимодействия в виртуальной среде ЦЭВ

Расширенная структура дополняется блоком, содержащим управляющий контроллер, с помощью которого реализуется управление адаптивной системой на основе компонент, обеспечивающих «подстройку» нейронечеткой системы логических правил с использованием нейросетевого ансамбля и базы знаний прецедентов. В особо сложных ситуациях, когда система испытывает затруднения в выполнении процедуры контроля, осуществляется логический вывод по прецеденту [6],[7] с соответствующей реализацией динамической картины взаимодействия.

**Определение 10.** Концептуальная модель преобразования информации при моделировании и визуализации сложных динамических сцен многорежимного управления имеет вид:

$$S = (F : T \times X \times Q \rightarrow Y), \quad (10)$$

где S — множество стратегий нечеткого управления; F — множество элементов, реализующих принцип конкуренции; X — оперативную базу данных; T — рассматриваемые моменты времени; Q — возможные значения вектора входных воздействий; A = T × X × Q — множество закономерностей в данных; Y — правила обобщения информации при моделировании и визуализации.

Реализация модели (10) достигнута путем создания хранилища данных интеллектуальной поддержки моделирования и визуализации поведения МДО на основе системы виртуальной реальности.

Процедуры принятия решений формализуются на основе анализа особенностей исследуемых ситуаций [66]–[68] с использованием следующих утверждений:

**Утверждение 4.** Надежность прогноза эволюции МДО при оценке динамики взаимодействия

определяется в зависимости от критериев развития ситуаций. Адаптивный прогноз строится на основе анализа результатов математического моделирования поведения МДО с использованием априорной информации.

**Утверждение 5.** Закономерности, используемые при построении базы знаний НФС, устанавливаются на основе фундаментальных представлений о развитии критических ситуаций в процессе движения МДО к целевому аттрактору. Описание этих закономерностей ведется для процессов взаимодействия, на основе теоретических и экспериментальных методов.

**Утверждение 6..** Нечеткие модели прогноза критических ситуаций строятся с использованием существенных факторов и закономерностей исследуемых процессов. Функционирование НФС обеспечивают контроль ситуации и выработку управленческих решений по обеспечению безопасности МДО.

Формирование управляющих воздействий реализуется в зависимости от критичности возникающих ситуаций с использованием относительной энтропии [7]. В качестве начального условия принимается допустимая энтропия системы  $\mathcal{E}_R=1$ , а ограничение выражается в следующем виде

$$R(S) = (1 - \mathcal{E}_E / \mathcal{E}_R K) \leq R(P), \quad (11)$$

где R(S) – степень отклонения системы от состояния равновесия;  $\mathcal{E}_E$  и  $\mathcal{E}_R$  – текущая и допустимая энтропия системы; R(P) – заданная степень отклонения системы от состояния равновесия, которая устанавливается параметрической настройкой.

Используя преобразование [7], получаем общее решение для количества необходимой информации в следующем виде

$$F_n(T_{CR}) = (T_{CR})^n \exp(-T_{CR}), \quad (12)$$

где  $T_{CR}$  – время обновления информации.

При интерпретации критических ситуаций в задачах оценки поведения МДО возникает ряд задач, требующих подходов, сформулированных в работе [10]. Среди них следует выделить класс задач, относящихся к числу *некорректно поставленных*, широким классом которых в рассматриваемых приложениях являются *обратные задачи* определения количественных характеристик по результатам их косвенных проявлений.

Последовательность операций выполнения преобразований в рамках пространств поведения  $R^n$  и управления  $R^r$  позволяет рассматривать цепочку компактных замкнутых множеств

$$M_1 \subset M_2 \subset \dots \subset M_n. \quad (13)$$

Задача нахождения приближенного квазирешения на компакте M сводится к минимизации функционала, т.е. к нахождению минимума функции переменных. Основным результатом исследования обратных задач сформулирован в виде следующих определений [10]:

**Определение 11.** Если отображение  $F_0 \rightarrow U_0$  компакта  $F_0$  на множество  $U_0$  взаимно однозначно и непрерывно, то обратное отображение  $U_0 \rightarrow F_0$  также непрерывно. Таким образом, минимизирующая последовательность  $\{z_n\}$  в методе подбора сходится к z при  $n \rightarrow \infty$ , если  $z_n$  принадлежит к классу возможных решений M и множество M – компакт.

Построение устойчивого к малым изменениям правой части приближенного решения по формуле  $z = A^{-1}u$  возможно в тех случаях, когда решение ищется на компакте  $M \subset F$  и правая часть уравнения принадлежит множеству  $U = AM$ .

**Определение 12.** Если уравнение  $Az = u$  может иметь на компакте  $M$  не более одного решения и проекция каждого элемента  $u \in U$  на множество  $N = AM$  единственно, то квазирешение уравнения единственно и непрерывно зависит от правой части  $u$ .

Таким образом, при переходе к квазирешению восстанавливаются все условия корректности, т.е задача нахождения квазирешения уравнения на компакте  $M$  является корректно поставленной. В результате обработки информации о поведении МДО в функциональном пространстве динамической среды взаимодействия на интервале  $[t_0, t_k]$  осуществляются операции интерпретации. При выполнении первого события реализуется правило  $P_1$ , которому соответствует алгоритм  $A_1$  и исходная фрактальная структура  $G_0$  преобразуется в структуру  $G_1$  и т.д. Эта последовательность определяется фиксированными положениями МДО, которые характеризуются фрактальными отображениями  $G_1, \dots, G_N$  в текущей ситуации:

$$\langle P_1, \dots, P_N; A_1, \dots, A_N \rangle. \quad (14)$$

Таким образом, множество реализаций динамики взаимодействия характеризуется упорядоченными правилами  $P_1, \dots, P_N$  и алгоритмами обработки информации  $A_1, \dots, A_N$ , с помощью которых обеспечивается оперативный контроль эволюции МДО в сложной динамической среде.

Применение изложенных подходов к интерпретации поведения МДО в вычислительной среде КМ связано с задачами поиска экстремальных значений функции интерпретации на интервале реализации, а также обработкой информации в задачах идентификации, аппроксимации и прогноза как некорректно поставленных и обратных задач нахождения пространственно-временных характеристик МДО.

Генерация сценариев взаимодействия МДО с внешней средой осуществляется на основе модели «сущность – связь» (рис. 5) [6],[7]. Исследуемый МДО в заданной ситуации функционирует в некотором окружении (внешняя среда), в качестве которой могут выступать другие объекты (совместная качка двух взаимодействующих МДО, расхождение МДО).

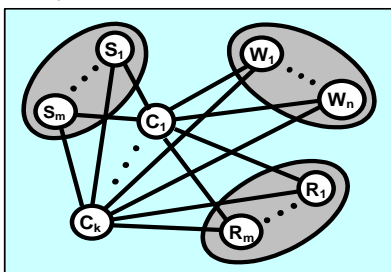


Рис. 5. Фрагмент семантической сети при анализе критических ситуаций

Основные информационные объекты (сущности) позволяют выделить следующие множества:  $S$  – множество сценариев (описание сценария и корректировки в параметрах модели);  $W$  – множество вариантов (состояния, описываемые информационной моделью);  $R$  – множество выводов (описания результатов моделирования конкретного сценария по каждому варианту);  $C$  – множество связей (вводятся для объединения в семантическую сеть кортежа  $\{S,W,R\}$ ; эти множества содержат только ссылки на экземпляры множеств  $S,W,R$ ).

### 3. Оценка эффективности генерируемых решений

Формализуем задачу оценки эффективности системы ППР в моделях вычислительного комплекса КМ. Реализация функции управления зависит от вектора параметров  $X \in R^n$ , определяющих поведение МДО, и вектора состояния среды  $W \in R^m$  в текущей ситуации. Если  $[X,W] \in A$ , то решение с вектором параметров  $X$  обеспечивает поддержание состояния МДО в динамической среде, характеризуемой вектором  $W$ . Если же  $[X,W] \in B$  то генерируемое решение приводит к неэффективной работе системы ППР. Приведенные условия определяют решение задачи выбора решения [8]:

$$x^*(X, W) > 0, \forall (X, W) \in A; \quad (15)$$

$$x^*(X, W) < 0, \forall (X, W) \in B, x^* \in X^*, \quad (16)$$

где  $x^*$  – выбранный класс разделяющих функций.

При реализации условий (15),(16) в ММК вычислительной среды КМ устанавливается диапазон возможных значений контролируемых параметров МДО. Каждой конкретной реализации технического решения соответствуют значения параметров, удовлетворяющих условиям [8]:

$$X_{i \min} \leq X_i \leq X_{i \max}, i = 1, \dots, n. \quad (17)$$

### Заключение

Таким образом, разработанный программный комплекс КМ можно рассматривать как совокупность организованных структур, обладающих поведением, реализующим целевую функцию адаптивного управления и ППР при контроле эволюции МДО в критических режимах. Формализации процесса поиска решений при переходе МДО в подмножество нормальных состояний из возникшего критического режима позволяет адекватно отображать причинно-следственные отношения исследуемой предметной области. Одной из основных проблем реализации концептуальных решений современной теории катастроф в СИИ является создание систем моделирования поведения, разработкой которых автор занимался совместно с Институтом Мозга под руководством выдающегося ученого – академика Н.П.Бехтерева [8].

## Литература

1. Губко М. В. Математические модели оптимизации иерархических структур / М. В. Губко. – М.: ЛЕНАНД, 2006.
2. Колмогоров, А.Н. Избранные труды в 6-ти томах / А. Н. Колмогоров. – М.: Наука, 2005. – 304 с.
3. Кук, Д. Компьютерная математика / Д. Кук, Г. Бейс. – М.: Наука. 1990. – 384 с.
4. Моисеев, Н. Н. Избранные труды / Н. Н. Моисеев. – М. Тайрекс Ко. 2003. т.1 – 376 с., т.2 – 264 с.
5. Нечаев, Ю. И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений: монография / Ю. И. Нечаев. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. – 392 с.
6. Нечаев, Ю. И., Непотопляемость судов: подход на основе современной теории катастроф: монография / Ю. И. Нечаев, О. Н. Петров. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2014. – 368 с.
7. Нечаев, Ю. И. Топология нелинейных нестационарных систем: теория и приложения: монография / Ю. И. Нечаев. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2015. – 332 с.
8. Нечаев, Ю. И. Проблемы информатики и вычислительной техники / Ю. И. Нечаев. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2017. – 320 с.
9. Солодовников, В. В. Теория сложности и проектирование систем управления / В. В. Солодовников, В. И. Тумаркин. — М.: Наука, 1990. – 341 с.
10. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М.: Наука, 1986. – 285 с.
11. Urgent Computing Workshop 2007 [Электронный ресурс] // Argonne National Lab, University of Chicago. – April 25-26, 2007. – Режим доступа: <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.

## References

1. Gubko M.V. Matematcheskie modeli optimizatii ierarchicheskich struktur [Mathematical models of optimization of hierarchy structures]. Moscow, LENAND Publ, 2006.
2. Kolmogorov A.N. Isbrannyye trudy v 6 tomakh [The selected works in 6 volumes]. Moscow, Science Publ, 2005.
3. Cook D, Bez H. Kompjuternaja of the mathematician [Computer mathematics]. Moscow, Science Publ. 1990.
4. Moiseyev N. N. Izbrannyye trudy [The selected works]. Moscow, Tyreks Co, 2003, V.1, V.2.
5. Nechaev Yu. I. Teoriya katastrof: sovremennyy podkhod pri prinyatii resheniy: monografiya [Catastrophe theory: the modern approach to decision-making]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ., 2011.
6. Nechaev Yu. I., Petrov O. N. Nepotoplyaemost' sudov: podkhod na osnove sovremennoy teorii katastrof: monografiya [Ship unsinkability: an approach on the basis of modern catastrophe theory]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ., 2014.
7. Nechaev Yu. I. Topologiya nelineynykh nestatsionarnykh sistem: teoriya i prilozheniya: monografiya [Topology of nonlinear non-stationary system: theory and application]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ., 2015.
8. Nechaev Yu.I. Problemy informatiki i vychislitel'noy tekhniki [Problems of informatics and computer technics]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ., 2018.
9. Solodovnikov V. V., Tumarkin V. I. Teoriya slozhnosti i proyektirovaniye sistem upravleniya [The theory of complexity and designing of control systems]. Moscow, Science Publ, 1990.
10. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya. Metody resheniya nekorrektnykh zadach [Methods of solving of incorrect problems]. Moscow, Science Publ, 1986.
11. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago. April 25-26, 2007. <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>



УДК 004.942:004.031.043

## КОНЦЕПЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ – ОТ КЛАССИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ К НОВОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

**Юрий Иванович Нечаев**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и информационных технологий

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, Лоцманская, 3

**Олег Николаевич Петров**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, Лоцманская, 3,  
e-mail: petr\_oleg@mail.ru

### Аннотация

Обсуждаются возникновение и развитие теории динамической непотопляемости – как нового раздела классической теории, основанного на представлении модели развития аварии в условиях неповрежденного корпуса. Затопление отсеков в такой модели происходит в условиях неповрежденного корпуса при движении судна на сильном волнении. В статье рассматриваются динамические аспекты новой теории, основанной на концепции современной теории катастроф, интегрирующей достижения интеллектуальных технологий и высокопроизводительных вычислений. Проведен структурный синтез динамической непотопляемости на основе концептуального базиса обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде. Модель интегрированного вычислительного комплекса, обеспечивающего оперативный контроль поведения судна в чрезвычайной ситуации, рассмотрим в рамках активной динамической системы. Процедуры моделирования и визуализации при контроле динамики аварийного судна содержат оценку компонент логических моделей системы поддержки принятия решений, оценку текущей ситуации, выработку практических рекомендаций, анализ альтернатив и принятие решений.

**Ключевые слова:** динамическая непотопляемость, современная теория катастроф, интеллектуальные технологии, мультипроцессорная среда, динамика взаимодействия, поддержка принятия решений.

## CONCEPT OF DYNAMIC FLOODABILITY - FROM CLASSICAL MODEL TO NEW INTERPRETATION

**Yuri I. Nechaev**

Dr.Sci.Tech, Professor, Professor of the Department of Computing Engineering and Information Technologies  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3

**Oleg N. Petrov**

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Computing Engineering and Information Technologies  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: petr\_oleg@mail.ru

### Abstract

The emergence and development of the theory of dynamic floodability is discussed - as a new section of the classical theory based on the representation of the accident development model under conditions of an intact hull. The flooding of compartments in such a model occurs under the conditions of an intact hull when a ship is moving in heavy heaving of sea. The article discusses the dynamic aspects of a new theory based on the concept of a modern theory of catastrophes, integrating the achievements of intelligent technologies and high-performance computing. The structural synthesis of dynamic flooding based on the conceptual basis of information processing in a multiprocessor computing environment was performed. A model of an integrated computing complex that provides operational control of a ship's behavior in an emergency situation will be addressed within the framework of an active dynamic system. The modeling and visualization procedures for monitoring the dynamics of a vessel in emergency contain an assessment of the components of the logical models of the decision support system, an assessment of the current situation, the development of practical recommendations, analysis of alternatives and decision making.

**Keywords :** dynamic floodability, modern theory of catastrophes, intellectual technologies, multiprocessor environment, interaction dynamics, decision-making support.

**Введение**

В основу разработки теории динамической непотопляемости приняты данные аварии РТМ «Тукан» в условиях неповрежденного корпуса. В процессе развития аварии затопление отсеков происходило вследствие поступления воды через отверстие, образовавшееся в комингсе грузового люка из-за удара волны, набегающей через кормовой слип, закрытие которого было сорвано набегающими с кормы волнами. Как следует из проведенного описания, авария развивалась при необычных обстоятельствах в условиях значительной неопределенности [1]. Тяжелый, но поучительный опыт аварии привел к необходимости более детального рассмотрения последовательного развития динамики сложных физических процессов, характерных для динамической непотопляемости в рамках современной теории катастроф и изобретений авторов [2] – [20].

**1. Структурный синтез динамической непотопляемости**

Рассмотрим теоретические основы оперативного контроля аварийной ситуации на основе концепции динамической непотопляемости в режиме экстренных вычислений (Urgent Computing – UC) [19]. Концептуальный базис интеллектуальных технологий, реализующий процедуры преобразования информации при интерпретации поведения аварийного судна на основе динамической теории катастроф представлен на рис.1.

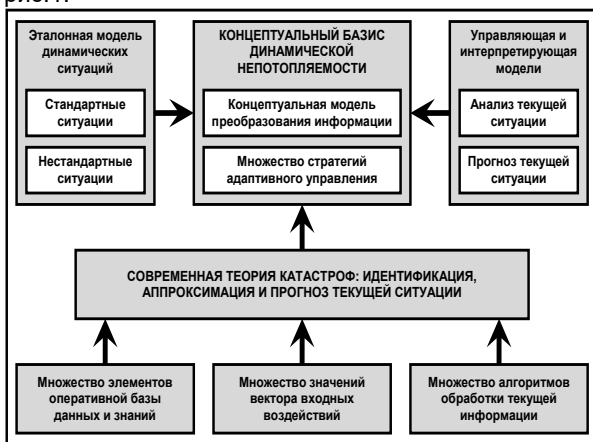


Рис.1. Концептуальный базис интеллектуальных технологий интерпретации динамической непотопляемости в чрезвычайной ситуации

Модель интерпретации ситуации характеризует область взаимодействия, в которой осуществляются преобразования и строятся геометрические отображения информации, позволяющие понимать процессы развития ситуации и выявлять «тонкие эффекты» изучаемого явления. Когнитивный процесс обеспечивает «сжатие» кода обрабатываемого сигнала с датчиков измерительного комплекса бортовой интеллектуальной системы (ИС) и максимально возможного абстрагирования содержащегося в сигнале описания ситуации для достижения более высокой степени предсказуемости [7] – [9].

Концептуальная модель обработки информации в программном комплексе бортовой ИС представлена в виде преобразования:

$$U(F) = \langle F(R^n, R^r); \{M(\tau) \times V(S) \times D(W)\} \rightarrow Y(R) \rangle, (1)$$

где  $U(F)$  – пространство вычислительной среды;  $F(R^n, R^r)$  – функционал, определяющий процедуры интерпретации в пространствах поведения и управления современной теории катастроф;  $M(\tau)$  – мультимодельный комплекс алгоритмов интерпретации эволюционной динамики аварийного судна;  $V(S)$  – множество элементов системы моделирования в процессе развития динамических ситуаций;  $D(W)$  – множество, содержащее процедуры генерации решений и выработку управляющих воздействий;  $Y(R)$  – множество, формирующее логические правила нечеткой формальной системы (НФС);  $\tau \in [t_0, t_k]$  – интервал времени реализации.

Модель интегрированного вычислительного комплекса, обеспечивающего оперативный контроль поведения аварийного судна в чрезвычайной ситуации, рассмотрим в рамках активной динамической системы (АДС) [10]. Состояние АДС в рассматриваемый момент времени  $t$  зависит от переменной состояния  $y \in A$  и от управляющих воздействий  $u \in U, y \in G(u)$ . На множестве  $U \times A$  задан функционал  $\Phi(u, y)$ , определяющий функционирование системы в режиме УС. Эффективность управления  $\Phi(u)$  достигается путем выбора такого допустимого управления, которое при известной реакции системы обеспечивает максимальное значение эффективности:

$$\Phi(u) \rightarrow \max (u \in U). (2)$$

Управляемые элементы АДС обладают свойством активности (свободы выбора своего состояния) и стремятся к выбору наилучших состояний (стратегий) при заданных или прогнозируемых значениях управляющих воздействий со следующими характеристиками:

$$ADS = \langle s \in S, Str(I, U), G(S, D), Int(F), Pref(F, E), Per(S), I(D), U(D) \rangle, (3)$$

где  $s \in S$  – элементы системы;  $Str(I, U)$  – структура системы в виде совокупности информационных и управляющих связей;  $G(S, D)$  – порядок функционирования (генерация стратегий и выбор решения);  $Int(F)$  – интервал функционирования;  $Pref(F, E)$  – предпочтения функциональных элементов системы (интерпретирующий и вычислительный модули);  $Per(S)$  – допустимое множество состояний;  $I(D)$  – информация на момент принятия решения и соответствующая целевая функция системы;  $U(D)$  – механизмы управления и совокупность правил принятия решений.

В рассматриваемой АДС, как самоорганизующейся системы, каждый новый процесс взаимодействия поднимает систему на новую более высокую эволюционную ступень организации. Формируемый процесс самоорганизации в целом обладает спиральной структурой, эволюционная схема которой формируется на основе последовательность состояний:

$$C_0 \rightarrow (N, S) \rightarrow C_1, C_1 \rightarrow (N, S) \rightarrow C_2, \dots, C_{n-1} \rightarrow (N, S) \rightarrow C_n \quad (4)$$

Концепция самоорганизующейся структуры (4) определяет ее перестроения во времени и пространстве на основе синергетической парадигмы [11] в зависимости от особенностей поведения аварийного судна и действующих возмущений. Формальный аппарат синтеза системы взаимодействия в рамках парадигмы связан с отображением процессов «расширения – сжатия» при движении системы на заданном интервале времени в виде алгоритма самоорганизации.

**2. Теоретические основы динамической непотопляемости**

Рассмотрим с позиций системного анализа теоретические основы и принципы построения программного комплекса контроля динамической непотопляемости. Концептуальная модель рассматриваемой проблемной области предусматривает, что основное системное отношение обеспечивает поддержание функциональной способности целого. Это дает возможность использовать в качестве правила операций с символами алфавита рассматриваемых компонент динамической непотопляемости принцип системной декомпозиции [7]-[9]. Соблюдение этого принципа обеспечивается путем выполнения следующих правил системной декомпозиции:

$$R(T) = R(S) \bigcup_i \left( \bigcup_{k=1}^K F(k)(o, a)_i \right); \quad (5)$$

$$R(D) = \bigcup_i \left( \langle o, a \rangle_i \times R(k)(o, a)_i \right); \quad (6)$$

$$\forall \langle o, a \rangle_j \in F(k)(o, a)_i, (F(k)(o, a)_i = 0) \quad (7)$$

где R(T) и R(D) – элементы множеств, представляющие собой решение задачи интерпретации, R(T) – множество выделенных пар (o, a)<sub>i</sub> (o – объект; a – атрибут) при решении задачи на k-м шаге декомпозиции; R(S) – общее число задач рассматриваемого множества; R(D) – отношение «зависеть от» R(D) ⊆ R(T) × R(T); i=1, ..., K; K – общее число шагов решения задачи (o, a)<sub>i</sub>. Условие (7) устанавливает множество пар имен объектов и атрибутов от которых зависит значение атрибута в постановке задачи интерпретации решения на i-м шаге.

Интегрированная среда моделирования и визуализации при контроле динамики аварийного судна содержит оценку компонент логических моделей системы ППР, математическое моделирование текущей ситуации, выработку практических рекомендаций, анализ альтернатив и принятие решений. Интеграция этих компонент осуществляется с использованием функциональных элементов:

$$\Phi(U) \cup \Phi(R) \cup \Phi(S) \cup \Phi(D), \quad (8)$$

где Φ(U) – функция управления вычислениями и моделированием; Φ(R) – функция, накладывающая ограничения на роли терминов и отношений между ними; Φ(S) – функция предметной области; Φ(D) – функция оперативных данных по выполняемым вычислениям и моделированию.

Формализованное ядро системы ППР при контроле динамики аварийного судна реализуется в рамках нечеткого логического базиса. Фундаментальной основой такой интерпретации является концепция нечетких целей и ограничений в рамках НФС [2],[5]. Повышение эффективности функционирования процедурной компоненты базы знаний достигается за счет использования принципа конкуренции и формализации процесса обработки нечеткой информации в высокопроизводительной вычислительной среде [6]. Другими принципами повышения эффективности ИС являются принцип открытости, принцип сложности и принцип нелинейной самоорганизации [7]-[9]. Реализация этих принципов осуществляется в рамках концепции мягких вычислений (Soft Computing) [20], интегрирующей нечеткую логику, теорию искусственных нейронных сетей (ИНС) и генетический алгоритм.

Теоретические основы формирования структуры данных вычислительной среды динамической непотопляемости реализуются в направлении перестройки организации информации в мультипроцессорной вычислительной среде [6]. Процесс перестройки в условиях эволюции сопровождается *фазовым переходом*, в результате которого отмечается качественный скачок в изменении элементов интерпретируемой системы, причем последовательность перестройки осуществляется в виде цепочки преобразования информации [9]:

$$F(SA) \rightarrow Fluct \rightarrow Bifurc \rightarrow Reorg \rightarrow F(NSA), \quad (9)$$

где F(SA) – функционирование системы в области притяжения исходной структуры-аттрактора; *Fluct* – притяжения (флуктуации); *Bifurc* – бифуркация; *Reorg* – реорганизация (фазовый переход); F(NSA) – функционирование в области новой структуры-аттрактора.

Задача прогнозирования поведения аварийного судна в рамках концепции динамической непотопляемости представляет собой цепочку преобразований:

$$X_1(T, S) \Rightarrow Y_1(Out), \dots, X_n(T, S) \Rightarrow Y_n(Out), \quad (10)$$

где компоненты X<sub>1</sub>(T,S), ..., X<sub>n</sub>(T,S) определяют функции интерпретации на каждом шаге выполнения операции интерпретации и управления динамической теории катастроф или модифицированной системы итерированных функций (СИФ) с использованием управляющих воздействий, а Y<sub>1</sub>(Out), ..., Y<sub>n</sub>(Out) – результаты прогноза исследуемой характеристики системы.

Физика процессов самоорганизации в системе ППР [2],[5],[15] связана с эволюцией судна как нелинейной нестационарной системы (NN-системы) на основе современной теории катастроф [7], динамическая модель которой рассматривает сущность процесса эволюции как единство необходимости и случайности. Ядро динамической модели катастроф составляют вопросы эволюции сложных систем как направленного моделирования процессов самоорганизации при движении системы к целевому аттрактору и при потере устойчивости и возникновении катастрофы. Из многообразия

поведения судна в аварийной ситуации на интервале реализации  $[t_0, t_k]$  путем абстракции извлекается существенное, которое определяет пространство функционирования в процессе самоорганизации (рис.2). На рисунке  $(\alpha, \beta, \eta)$  и  $(\alpha^*, \beta^*, \eta^*)$  – ограниченные операторы пространств поведения  $R^n$  и управления  $R^r$  в процессе движения к целевому аттрактору (Stab) и при потере устойчивости (Cat);  $f_1, f_2, \dots, f_n$  и  $F_1, F_2, \dots, F_n$  – функции поведения и управления динамической модели катастроф.

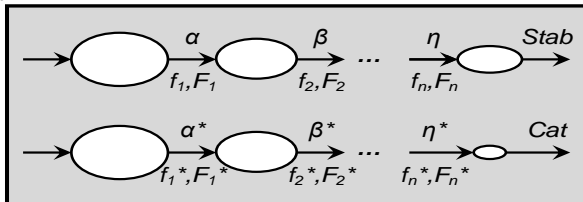


Рис 2. Фрактальная структура, отображающие эволюцию NN-системы на интервале реализации

Оценка риска – один из функциональных элементов системы ППР, позволяющий оператору ИС принять решение о безопасности судна и оценить возможные сценарии ситуаций, в которых оно может находиться в процессе эксплуатации (рис.3). Среди известных методов оценки риска в задачах безопасности мореплавания выделены подходы, основанные на анализе множества ситуаций, в которых может находиться судно за время эксплуатации [2], [5], [8],[15].

Задача оценки риска сводится к генерации сценариев и определению вектора расчетных ситуаций, где каждый элемент – это набор параметров ситуации (параметры судна и внешней среды  $X_{int}$ ). Характеристическое множество определяется уровнем методов, применяемых для изучения расчетных ситуаций. На рисунке использованы следующие обозначения:  $X_{int}$  – входная информация;  $S(t)$  – генерируемые ситуации на основе целевой функции;  $J_0(t)$  – стратегии управления;  $X_{out}$  – управляющие воздействия.

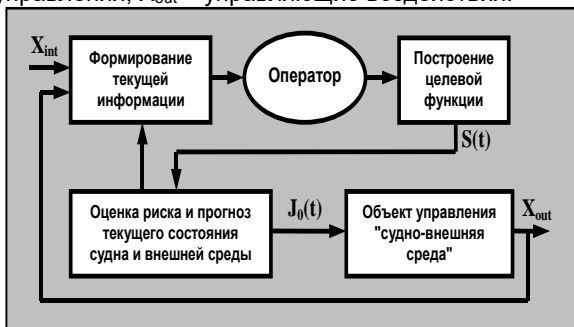


Рис.3. Генерация сценариев и оценка риска чрезвычайных ситуаций

Данные рис.3 позволяют на заданном интервале времени  $[t_0, t_k]$  определить искомое решение поставленной задачи оценки риска. Анализ ведется в режиме УС с использованием методов

математического моделирования. При этом реализуются соотношения:

$$\{S^t\}_j^\alpha = F^\alpha(\{S^t\}, S_j^t, j); \{S^t\}^\alpha = \bigcup_{j=1}^m \{S^t\}_j^\alpha; \quad (11)$$

$$\{S^t\}^\beta = \{S^t\} \setminus \{S^t\}^\alpha \quad (j=1, \dots, m).$$

Здесь  $\{S^t\}^\alpha$  и  $\{S^t\}^\beta$  - подмножества запрещенных состояний для всей ИС и для отдельных подсистем;  $\{S^t\}^\beta$  - подмножество разрешенных состояний. Функция рассогласования, определяющая качество решения при реализации коллективной стратегии, построена на основе модели выбора. Однако во многих случаях можно ограничиться построением критерия в рамках НФС и использования нечеткой модели риска [18].

### 3. Современная теория катастроф при интерпретации динамической непотопляемости.

В результате проведенного анализа на базе достижений классической математики и интеллектуальных технологий создана модель современной теории катастроф при интерпретации динамической непотопляемости. Задачи, определяющие динамическую модель катастрофы в рамках парадигмы обработки информации в мультипроцессорной вычислительной среде, приведены на рис. 4. Возможны различные интерпретации современной теории катастроф в зависимости от рассматриваемой проблемы. Исходным является понятие множества, позволяющего определить основные понятия новой теории динамической непотопляемости математически приемлемым способом. В общем виде геометрическую интерпретацию динамической модели катастрофы при исследовании поведения аварийного судна можно представить в виде отображения:

$$Cat(G) = \langle Cat(B), Cat(E, DO), Cat(F, DO) \rangle, \quad (12)$$

где  $Cat(B)$  – бифуркационное множество,  $Cat(E, DO)$  – множество, определяющее взаимодействие аварийного судна как динамического объекта (DO) с внешней средой (E);  $Cat(F, DO)$  – множество, определяющее особенности судна.

Аналитическая интерпретация физической картины взаимодействия на основе компоненты  $A(Cat)$  имеет вид:

$$Cat(A) = \langle A(CR), A(PH), A(NF) \rangle, \quad (13)$$

где  $A(CR)$  – математическая модель, отображающая оценку динамической среды взаимодействия на основе критериальных соотношений, разработанных в рамках стандартных алгоритмов проблемной области;  $A(PH)$  – математическая модель, отображающая оценку динамической среды с помощью теории стохастических систем, теории детерминированного хаоса и синергетической парадигмы;  $A(NF)$  – математическая модель, отображающая оценку динамической среды на основе нейронечеткой системы.



Рис.4. Задачи, определяющие динамическую модель катастрофы

Формализация моделей (12),(13) осуществляется в рамках теории сложности, требующей одновременного учета структуры модели и ее адекватности [7]-[9]. Компоненты этих моделей формируются на основе принципа конкуренции:

$$Com(PR) = \langle ST, FLM, ANN \rangle, \quad (14)$$

где ST – стандартная модель, описывающая аварийную ситуацию на основе теории корабля и достижений классической математики; FLM – модель, реализованная в рамках нечеткого логического базиса; ANN – нейросетевая модель.

Выбор модели осуществляется на основе анализа альтернатив. Предпочтение отдается модели, удовлетворяющей принципу сложности [16] и позволяющей получить искомое решение за выделенный интервал времени. Реализация принципа конкуренции тесно связана с концепцией мягких вычислений, находящей широкое применение при разработке современных технических приложений на основе интеллектуальных технологий [2],[5],[6] – [9],[15].

**4. Мультимодельный комплекс контроля динамической непотопляемости**

Формализованное ядро системы ППР при контроле динамики аварийного судна реализуется в рамках нечеткого логического базиса. Фундаментальной основой такой интерпретации является концепция нечетких целей и ограничений в рамках НФС [2],[5],[15]. Повышение эффективности функционирования процедурной компоненты базы знаний достигается за счет использования принципа конкуренции и формализации процесса обработки нечеткой информации в высокопроизводительной вычислительной среде [6]. Реализация этого принципа осуществляется в рамках концепции мягких вычислений [20].

Теоретический базис, положенный в основу построения модели динамической непотопляемости при взаимодействии аварийного судна с внешней средой реализуется в виде R-модели [8], которая

получила название «модель моделей» или репромодель RM (от англ. reproduce – воспроизводить, породить). R-модель представляет собой интерпретирующую теорию, обеспечивающую исследование процессов и явлений в сложных динамических средах, характерных для динамики аварийного судна (рис.5).

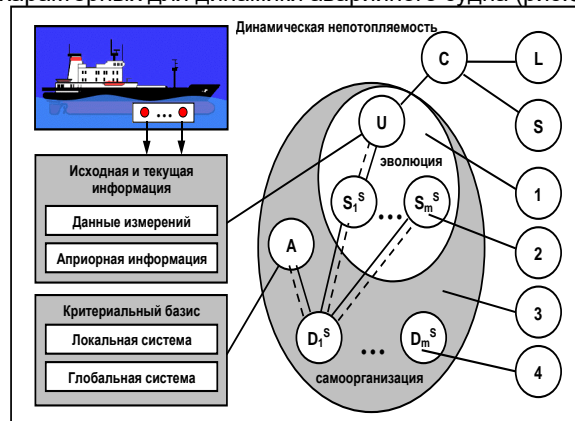


Рис.5. Поток информации при функционировании системы интеллектуальной поддержки оператора: 1 – статика RM; 2 – динамика RM; 3 и 4 – ансамбль моделей статике и динамики

Здесь С – концептуальная модель; S – система (объект) моделирования; S<sub>1</sub>(M),...,S<sub>m</sub>(M) и D<sub>1</sub>(M),...,D<sub>n</sub>(M) – статические и динамические модели прогноза и оперативного управления; U – управляющая компонента, обеспечивающая переход к статическим и динамическим моделям; L – язык моделирования, характеризующий типовые математические схемы и структуры; A – алгоритм поведения системы, включающий критериальный базис, определяющий локальную и глобальную системы нормирования. Локальная система содержит требования, связанные с индивидуальными особенностями судна, а глобальная система включает требования национальной и международной систем, регламентирующих безопасность судна.

Выделенные для анализа динамической непотопляемости знания об особенностях взаимодействия аварийного судна как управляемого объекта в рассматриваемой ситуации «кодируются» в форме взаимосвязанных «моделей» и «параметров». В теории систем параметром называют абстрактный образ свойства. Поэтому каждый параметр можно рассматривать как модель соответствующего свойства.

R-модель определим как отношение между параметрами аварийного судна (свойствами, характеристиками) для исследования его поведения в сложной динамической среде на основании методов теории корабля, классической математики и нестандартных алгоритмов обработки информации (нейронечеткие системы, эволюционное моделирование, когнитивные и фрактальные структуры). Формально R-модель можно представить как интегрированную структуру, осуществляющую преобразование:

$$RM\{NF(J),NF(C),[t_0,t_k]\}, \quad (15)$$

где NF(J) – математические конструкции, описывающие поток информации в процессе

анализа и интерпретации текущей ситуации;  $NF(C)$  – когнитивные и фрактальные структуры, используемые при выработке и реализации практических рекомендаций;  $[t_0, t_r] \in T$  – заданный интервал времени обработки текущей информации. Среди множества описаний, составляющих R-модель, наибольший теоретический и практический интерес вызывает динамическая структура, которая рассматривается как универсальная модель, отображающая сложные процессы взаимодействия в условиях непрерывного изменения поведения объекта и внешней среды. Таким образом, понятие «R-модель» различно в зависимости от особенностей взаимодействия аварийного судна с внешней средой, а моделирование рассматривается как способ отражения сходства исследуемых объектов в виде соответствия между их элементами и отношениями.

Исследования в области приложений теории динамических систем в ИС новых поколений осуществляются на уровне моделей и параметров. Поэтому при описании динамики взаимодействия введем в рассмотрение некоторое формализованное пространство, которое будем называть модельно-параметрическим пространством интегрированной R-модели – множество моделей, параметров и отношений между ними, характеризующих свойства объектов при исследовании текущей ситуации в рамках парадигмы [6]. В этом пространстве модели связываются между собой посредством параметров, а параметры – с помощью моделей. В качестве параметра  $P$  при интерпретации текущих ситуаций на основе R-модели рассматривается формализованное свойство (характеристика), определяющая поведение аварийного судна в сложной динамической среде. Информационная среда интерпретации динамической непотопляемости представляется в виде средств и задач моделирования (рис.6)

Особое значение при моделировании поведения аварийного судна в рамках концепции динамической непотопляемости имеют *функциональная полнота и логическая целостность*. Эти требования к формализации R-модели необходимы для решения заданного класса задач геометрической и аналитической интерпретации поведения судна на различных стадиях эволюции процесса затопления. Критерий функциональной полноты R-модели зависит от класса решаемых задач и требует определения критерия глубины детализации динамической сцены взаимодействия аварийного судна с внешней средой. Именно формальная постановка задач, решаемых с помощью R-модели, позволяет выделить особенности текущей ситуации, моделирование которых является необходимым и достаточным условием для решения поставленной задачи интерпретации динамической непотопляемости.

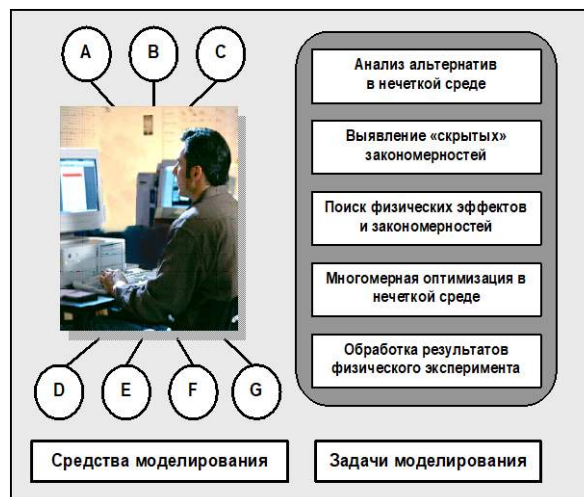


Рис. 6. Информационная среда анализа и интерпретации решений: последовательность А – G определяет методы моделирования: А – методы численного анализа; В – метод фазовой плоскости; С – теория графов; D – нечеткое моделирование; E – нейросетевое моделирование; F – когнитивное моделирование; G – физическое моделирование.

### 5. Интеллектуальные технологии обеспечения динамической непотопляемости

Теоретическая база ИС формируется на основе эффективного сочетания накопленной системы знаний с новыми подходами и парадигмами искусственного интеллекта [8]. Среди них важная роль принадлежит методам и моделям, обеспечивающим формализацию и интеграцию знаний, механизм логического вывода, поиск решений и выдачу практических рекомендаций в условиях неопределенности и неполноты исходной информации.

Процедурная компонента, обеспечивающая функционирование динамической базы знаний содержит большой объем вычислений. Они связаны с обработкой и анализом информации, поступающей с датчиков измерительной системы, построением и анализом математических моделей оценки и прогноза рассматриваемых ситуаций, имитационным моделированием взаимодействия аварийного судна с внешней средой.

Наибольший практический интерес представляют методы реконструкции и прогнозирования временных рядов при моделировании динамики аварийного судна, связанные со «сжатием» информации, поиском «скрытых» закономерностей и повышением информативности информации, а также методы, обеспечивающие контроль режима функционирования ИС при различном уровне внешних возмущений. Реализация этих методов ведется с использованием нелинейных стохастических моделей взаимодействия аварийного судна с внешней средой и статистических моделей, описывающих временную последовательность сигналов измерительной информации. Повышение надежности методов и моделей анализа и прогноза развития сложных ситуаций достигается за счет реализации принципа конкуренции для двух вычислительных технологий: стандартной технологии моделирования, основанной на использовании методов классической теории



управления и теории корабля, а также интеллектуальной технологии с использованием нейро-нечетких моделей, концепций Data Mining и Soft Computing [7] – [9].

В результате выполнения процедур идентификации, аппроксимации и прогноза на схеме (рис.7) высвечивается группа затопленных отсеков, а справа в режиме УС выводятся на экран основные динамические характеристики, определяющие текущие значения равновесных углов крена  $\theta_0$  и дифферента  $\psi_0$ , а также критического интервала времени  $\tau_{CR}$ . При достижении каждой из этих характеристик предельного (критического значения) на экране появляется соответствующее значение на красном фоне.

### Заключение

Настоящая статья представляет собой обобщение результатов исследований в области реализации современной теории катастроф в задачах контроля динамической непотопляемости аварийного судна на волнении. Теоретический базис такой интеграции рассмотрен в рамках геометрической и аналитической интерпретации текущих ситуаций в сложных динамических средах. При этом сохраняются достижения классической теории непотопляемости судов, развитые в работах А. Н. Крылова, В. Г. Власова, С. Н. Благовещенского и их последователей.

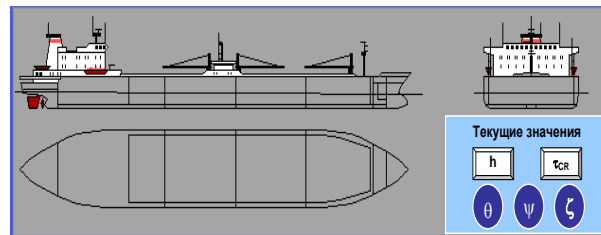


Рис.7. Схема отсеков (продольный разрез)

При изложении материала основное внимание обращается на формулировку основных принципов, методов и моделей, определяющих это новое научное направление. Акцент сделан на интерпретацию наиболее сложных задач в области динамики аварийного судна – поведение NN-систем при взаимодействии с внешней средой. Совершенствование динамической теории непотопляемости на базе современной теории катастроф связано с расширением и углублением анализа и синтеза геометрических и аналитических структур данных, а также формулировкой теоретической базы их интерпретации. Формирование фрактальных структур на основе математического моделирования эволюции аварийного судна при движении к целевому аттрактору открывает возможности получения новых объяснений феноменов физических явлений и процессов в бортовых ИС ППР по обеспечению живучести аварийного судна.

### Литература

1. Бондарев, В. А. Реквием по судам Калининградского района / В. А. Бондарев, В. М. Букатый, В. А. Серенков, В. И. Тарушин // РТМ-7002 «Тукан», с.72 – 78.
2. Бортовые интеллектуальные системы. Ч. 2. Корабельные системы. — М.: Радиотехника, 2006. — 80 с.
3. Колмогоров, А. Н. Теория информации и теория алгоритмов / А. Н. Колмогоров. — М.: Наука, 1987. — 304 с.
4. Моисеев, Н. Н. Избранные труды / Н. Н. Моисеев. — М. Тайрекс Ко. 2003. т.1 – 376 с., т.2 – 264 с.
5. Нейрокомпьютеры в интеллектуальных технологиях XXI века. — М.: Радиотехника, 2011.— 352 с.
6. Нечаев, Ю. И. Математическое моделирование в бортовых интеллектуальных системах реального времени / Ю. И. Нечаев // Труды 5-й всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика-2003». — М.: МИФИ, 2003. Лекции по нейроинформатике. Ч. 2, с.119–179.
7. Нечаев, Ю. И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений: монография / Ю. И. Нечаев. — Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. — 392 с.
8. Нечаев, Ю. И., Непотопляемость судов: подход на основе современной теории катастроф: монография / Ю. И. Нечаев, О. Н. Петров. — Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2014. — 368 с.
9. Нечаев, Ю. И. Топология нелинейных нестационарных систем: теория и приложения: монография / Ю. И. Нечаев. — Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2015. — 332 с.
10. Новиков, Д. А., Курс теории активных систем / Д. А. Новиков, С. Н. Петраков. — М.: СИНЕГ, 1999. — 104 с.
11. Синергетическая парадигма. Многообразие поисков и подходов. — М.: Прогресс – Традиция, 2000. — 536 с.
12. Способ контроля непотопляемости судов / Патент РФ №2518374 от 09.04. 2014 / Нечаев Ю.И.
13. Способ контроля экстремальных ситуаций в условиях неопределенности среды / Патент РФ № 2580367 от 08.06.2016 / Нечаев Ю.И., Петров О.Н.
14. Способ оперативного контроля остойчивости судна / Патент РФ № 2631127 от 19.09.2017. Нечаев Ю.И., Петров О.Н.
15. Системы искусственного интеллекта в интеллектуальных технологиях XXI века. — Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. — 376 с.
16. Солодовников, В. В. Теория сложности и проектирование систем управления / В. В. Солодовников, В. И. Тумаркин. — М.: Наука, 1990. — 341 с.
17. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. — М.: Наука, 1986. — 285 с.
18. Kosterev, V. V. Aggregation of probabilistic and fuzzy information in risk assessment. / V. V. Kosterev, A. N. Averkin // Proceedings of the International Conference on Soft Computing and Measurements. St-Petersburg, 1999, p.p.196–199.
19. Urgent Computing Workshop 2007 [Электронный ресурс] // Argonne National Lab, University of Chicago. — April 25-26, 2007. — Режим доступа: <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.
20. Zadeh, L. Fuzzy logic, neural networks and soft computing / L. Zadeh // Commutation on the ASM-1994. V.37. №3, p.p.77–84.



## References

1. Bondarev V. A. Bukatyy V. M., Serenkov V. A., Tarushin V. I. Rekvijem po sudam Kaliningradskogo rayona [Requiem on vessels of the Kaliningrad area] RTM-7002 «Tukan», pp. 72 – 78.
2. Bortovyye intellektual'nyye sistemy. CH. 2. Korabel'nyye sistemy [Onboard intellectual systems. Part 2. Ship systems] Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006.
3. Kolmogorov A. N. Teoriya informatsii i teoriya algoritmov [Information theory and the theory of algorithms]. Moscow, Science Publ., 1987.
4. Moiseyev N. N. Izbrannyye trudy [The selected works]. Moscow, Tyreks Co. 2003, V.1, V.2.
5. Neyrokomp'yutery v intellektual'nykh tekhnologiyakh XXI veka [Neurocomputers in intellectual technologies of XXI century]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2011.
6. Nechaev Yu. I. Matematicheskoye modelirovaniye v bortovykh intellektual'nykh sistemakh real'nogo vremeni [Mathematical modeling in real time onboard intelligence systems]. Works of 5th All-Russia scientific and technical conference «Neuroinformatic-2003». Moscow, MIFI Publ., 2003.
7. Nechaev Yu. I. Teoriya katastrof: sovremennyy podkhod pri priyatii resheniy: monografiya [Catastrophe theory: the modern approach to decision-making]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ., 2011.
8. Nechaev Yu. I., Petrov O. N. Nepotoplyaemost' sudov: podkhod na osnove sovremennoy teorii katastrof: monografiya [Ship unsinkability: an approach on the basis of modern catastrophe theory]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ., 2014.
9. Nechaev Yu. I. Topologiya nelineynykh nestatsionarnykh sistem: teoriya i prilozheniya: monografiya [Topology of nonlinear non-stationary system: theory and application]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ., 2015.
10. Novikov D. A., Petrakov S. N. Kurs teorii aktivnykh sistem Novikov [Course of the theory of active systems]. Moscow, SINEG Publ., 1999.
11. Sinergeticheskaya paradigma. Mnogoobrazie poiskov i podkhodov [Synergetic paradigm. The variety of searches and approaches]. Moscow, Progress-Tradition Publ., 2000.
12. Sposob kontrolya nepotoplyayemosti sudov [Method of the control of ships unsinkability]. The patent of Russian Federation #2518374, 09.04.2014. Nechaev Yu. I.
13. Sposob kontrolya ekstremal'nykh situatsiy v usloviyakh neopredelennosti sredy [Method of the control of extreme situations in the conditions of uncertainty of environment]. The Patent of Russian Federation #2580367, 06.08.2016. Nechaev Yu. I., Petrov O. N.
14. Sposob operativnogo kontrolya ostroychivosti sudna [Method of the operative control of ships stability]. The patent of Russian Federation #2631127, 09.19.2017. Nechaev Yu. I., Petrov O. N.
15. Sistemy iskusstvennogo intellekta v intellektual'nykh tekhnologiyakh XXI veka [Systems of an artificial intellect with intellectual technologies of the XXI century]. Saint-Petersburg, Art-Express Publ, 2011.
16. Solodovnikov V. V., Tumarkin V. I. Teoriya slozhnosti i proyektirovaniye sistem upravleniya [The theory of complexity and designing of control systems]. Moscow, Science Publ, 1990.
17. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya. Metody resheniya nekorrektnykh zadach [Methods of solving of incorrect problems]. Moscow, Science Publ, 1986.
18. Kosterev V.V., Averkin A.N. Aggregation of probabilistic and fuzzy information in risk assessment. — Proceedings of the International Conference on Soft Computing and Measurements. St-Petersburg, 1999, p.p.196–199.
19. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago. April 25-26, 2007. <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.
20. Zadeh L. Fuzzy logic, neural networks and soft computing. Commutation on the ASM-1994. Vol.37. #3, p.p.77–84.

УДК 004.832.25:004.023:004.891.2

## ДВУХКОМПОНЕНТНЫЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО И БЕЗОПАСНОГО МАРШРУТА СУДНА

**Иван Андреевич Янчин**

аспирант

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, Лоцманская, 3

e-mail: yanchin@pm.me

**Олег Николаевич Петров**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, Лоцманская, 3,

e-mail: petr\_oleg@mail.ru

### Аннотация

Работа представляет алгоритм построения оптимального и безопасного маршрута судна, состоящий из двух компонентов. Первый компонент предназначен для построения отдельных маршрутов и использует эвристический подход. Вторым компонентом является параллельный генетический алгоритм, оперирующий маршрутами с целью выбора или формирования оптимального решения задачи. Метод заключается в построении набора локально-оптимальных решений и последующей оптимизации с использованием параллельного генетического алгоритма. Предлагаемый алгоритм не требует использования графа или сетки, а также позволяет налагать различные ограничения на формируемый маршрут как на уровне маршрута целиком, так и на уровне отдельных путевых точек. Использование функций приспособления, оценивающих «качество» маршрутов и их отдельных компонентов, делает возможным адаптацию предлагаемого алгоритма для решения задачи поиска маршрута судна с практически произвольными ограничениями. Для тестирования были выбраны две карты, одна из которых предназначена для проверки способности алгоритма прокладывать маршрут, требующий активного маневрирования, вторая описывает большую область, содержащую много мелких препятствий.

**Ключевые слова:** оптимальный маршрут, генетический алгоритм, параллельные вычисления, параллельный генетический алгоритм, оптимизация пути.

## TWO-COMPONENT PARALLEL GENETIC ALGORITHM FOR PLOTTING THE OPTIMAL AND SAFE ROUTE OF THE SHIP

**Ivan A. Yanchin**

post-graduate student

St. Petersburg State Marine Technical University

190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3

e-mail: yanchin@pm.me

**Oleg N. Petrov**

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Computing Engineering and Information Technologies

St. Petersburg State Marine Technical University

190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3

e-mail: petr\_oleg@mail.ru

### Abstract

The paper presents an algorithm for plotting the optimal and safe ship route, consisting of two components. The first component is designed to build separate routes and uses a heuristic approach. The second component is a parallel genetic algorithm that operates with routes in order to select or formulate the optimal solution to the problem. The method consists in designing a set of locally optimal solutions and subsequent optimization using a parallel genetic algorithm. The proposed algorithm does not require the use of a graph or grid, and also allows imposing various restrictions on the generated route, both at the route level as a whole and at the level of individual waypoints. The use of adaptation functions, evaluating the "quality" of the routes and their individual components, makes it possible to adapt the proposed algorithm to solve the problem of finding the ship route with almost arbitrary limitations. Two maps were chosen for testing, one of which is designed to test the ability of the algorithm to plot a route requiring active maneuvering, the second describes a large area containing many small obstacles.

**Keywords :** optimal route, genetic algorithm, parallel computing, parallel genetic algorithm, route optimization.

## Введение

Задача поиска оптимального и безопасного маршрута судна является, с одной стороны, важной для отрасли, так как сокращение времени рейса приводит к снижению связанных затрат [6], а с другой, представляет собой непростую с алгоритмической точки зрения задачу.

Традиционно, для решения этой задачи применяются алгоритмы, используемые для поиска пути на графах, такие как Алгоритм Дейкстры, динамическое программирование и генетические алгоритмы [9]. В то же время, все предлагаемые алгоритмы подразумевают использование графа или сетки, наложенных на карту акватории, и поиск маршрута выполняется именно на основе графа или сетки. Из этого требования вытекают ограничения приведённых методов: перед началом построения маршрута необходимо сначала подготовить граф, что, само по себе, может быть непростой задачей, кроме этого, использование графа (как и сетки) ограничивает свободу движения судна, сводя выбор направления движения к рёбрам графа.

В то же время, на маршруты могут быть наложены дополнительные ограничения, связанные с сокращением расхода топлива [9], или обеспечением безопасности при прохождении по акваториям, с динамическими препятствиями, например, льдом [1], алгоритмы поиска пути на графах могут не позволять вводить дополнительные ограничения на решение, что требует разработки собственных модификаций [1].

Настоящая работа предлагает двухкомпонентный алгоритм поиска оптимального и безопасного маршрута судна, основанный на использовании эвристических вычислений и генетического алгоритма. Предлагаемый алгоритм не требует использования графа или сетки, а также позволяет налагать различные ограничения на формируемый маршрут как на уровне маршрута целиком, так и на уровне отдельных путевых точек. Использование функций приспособления, оценивающих «качество» маршрутов и их отдельных компонентов, делает возможным адаптацию предлагаемого алгоритма для решения задачи поиска маршрута судна с практически произвольными ограничениями, предъявляемыми к решению.

### 1. Описание метода

Задача состоит в нахождении маршрута судна, движение по которому занимает наименьшее время, но который не приводит к столкновению с каким-либо препятствием. Хотя погодные условия, такие как волнение и локальные течения оказывают влияние на движения судна, а приливно-отливные течения приводят к изменению глубин области с течением времени, эти аспекты не рассматриваются настоящей работой и являются предметом дальнейших исследований. В качестве входных значений, алгоритм принимает размерения судна, для которого выполняется поиск маршрута, координаты точки начала движения и точки назначения; область задачи описывается картой, предоставляющей средние значения глубин. Так как изменение глубин области вследствие приливно-отливных течений не учитывается, карта глубин считается константной, поэтому безопасной

областью карты считается такая, чья глубина больше осадки судна.

#### 1.1. Построение отдельных маршрутов

Задачей первого компонента предлагаемого решения является построение отдельных маршрутов от точки начала движения, до точки назначения. В контексте рассматриваемой задачи, маршрут представляет собой последовательность маршрутных точек, каждая из которых соответствует некоторому географическому расположению. Точка начала движения всегда является первой точкой маршрута, а точка назначения – последней точкой маршрута. Фрагмент маршрута, расположенный между двумя точками, называется ребром; таким образом, двигаясь по маршруту, судно должно следовать по ребрам и пройти через все промежуточные точки в правильном порядке.

Алгоритм построения отдельных маршрутов итеративный и формирует маршрут из отдельных точек, добавляя в результате итерации к маршруту очередную точку. Процесс завершается, когда формируемый маршрут достигает точки назначения или когда количество точек маршрута превышает некоторую границу, которая препятствует возникновению бесконечных циклов. Рисунок 1 иллюстрирует метод.

В окрестности последней точки формируемого маршрута генерируется некоторое количество случайных точек, после чего все они оцениваются функцией приспособления, и из них выбирается та, для которой оценка наибольшая. Выбранная точка присоединяется к маршруту и становится его новой последней точкой, после чего процесс повторяется для неё. Так как точки, генерируемые на каждом этапе, случайны то предсказать, когда будет сгенерирована точка, равная точке назначения нельзя. Для этого, если маршрут достигает некоторой окрестности точки назначения, то случайные точки не генерируются, а точка назначения присоединяется к маршруту, и процесс завершается.

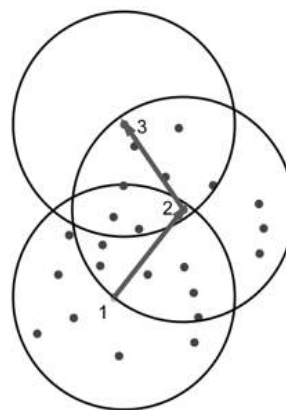


Рис. 1. Построение маршрута как набора точек.

Случайные точки генерируются в круговой окрестности последней точки маршрута, и обычно размер этой окрестности является константным. В то же время, настоящая работа предлагает три метода изменения размера этой области. В первом случае, с каждой итерацией алгоритма область увеличивается на некоторую величину, в результате чего новые

точки генерируются во всё большей области, что позволяет маршруту «выйти» из локальных оптимумов. Во втором случае, размер области изменяется случайным образом, что позволяет более точно обойти препятствия. В третьем случае, размер области постоянен, однако вводится понятие минимального расстояния между точками. Благодаря этому, формируется маршрут с небольшим количеством точек и протяжёнными рёбрами, что позволяет эффективнее преодолевать большие открытые области карты.

В процессе исследований было установлено, что при простом генерировании случайных точек в окрестности другой, они оказываются распределены неравномерно по окрестности (рисунок 2).

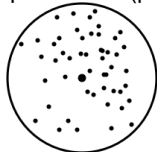


Рис. 2. Неравномерное расположение точек.

Для решения проблема неравномерного расположения точек, окрестность разделяется на ряд секторов равного размера, и точки генерируются с привязкой к секторам. Каждый сектор содержит одинаковое количество точек, а в пределах сектора точки располагаются случайным образом (рисунок 3).

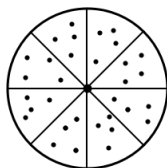


Рис. 3. Использование секторов делает расположение точек более равномерным.

В процессе экспериментов установлено, что использование секторов позволяет сократить общее количество генерируемых точек, без снижения качества формируемого маршрута.

### 1.2. Функция приспособления точки

Эффективность алгоритма зависит от того, насколько выбираемые точки приближают решение поставленной задачи. Для выбора точек используется функция приспособления, которая должна оценивать точку тем выше, чем больше выгода маршрута от её использования.

$$FF = -\xi \frac{d_{id}}{d_{cd}} + \psi \frac{\Theta}{180} \quad (1)$$

В результате исследований была сформулирована функция (1), решающая задачу оценки точек исходя из значений двух компонентов: поощрения за движения вперёд и штрафа за движение назад. В этой формуле коэффициенты  $\xi$  и  $\psi$  задают веса компонентов, и обычно имеют значение 1, но могут быть изменены для более точной настройки функции. Величина  $d_{id}$  описывает расстояние между оцениваемой точкой и точкой назначения, а величина  $d_{cd}$  – расстояние между

последней точкой маршрута и точкой назначения. Таким образом, величина этого компонента зависит от того, насколько близко оцениваемая точка приближает маршрут к цели относительно последней точки маршрута. Так как меньшее расстояние лучше, знак компонента меняется на противоположный. Штраф за движение назад вычисляется как угол между ребрами, первое из которых между оцениваемой точкой и точкой назначения, а второе – между последней точкой маршрута и точкой перед ней.

Такая двухкомпонентная функция оценки точек требует от маршрута двигаться вперёд, пока это возможно, но допускает движение в обратном направлении, если путь оказывается заблокирован. Штраф за движение назад приводит к тому, что выбранное направление выдерживается максимально долго, даже если, фактически, это движение в противоположном от цели направлении, благодаря чему становится возможным обойти препятствия сложной структуры.

Функция приспособления используется для оценки тех точек, которые в принципе достижимы, если же судно не имеет возможности попасть в окрестность точки, в виду того, что путь к ней заблокирован препятствием или сама точка указывает на препятствие, то ей присваивается минимальная оценка, и в дальнейшем она не рассматривается.

Использование составной функции приспособления для оценки точек маршрута позволяет при необходимости добавить дополнительные компоненты, выражающие ограничения или предъявляемые к точкам требования.

### 1.3. Генетический алгоритм формирования итогового решения

Для формирования итогового решения используется генетический алгоритм, который манипулирует целыми маршрутами. Начальное поколение формируется первым компонентом алгоритма, в дальнейшем, если численность особей в популяции оказывается ниже заданной границы, первый компонент используется для восполнения недостающих особей. Численность особей в популяции является параметром алгоритма и может быть сконфигурирована при необходимости.

Так как количество промежуточных маршрутных точек в отдельном маршруте может быть практически произвольным, то используемый генетический алгоритм относится к классу генетических алгоритмов с переменным размером особи. Генетические алгоритмы с переменным размером особи доказали свою эффективность при решении задач планирования [4], поиска маршрута [5], а также задач, при решении которых введение ограничений на размер особи приводит к снижению эффективности поиска решения [8].

Как в случае с любым другим генетическим алгоритмом, описываемый алгоритм использует операторы скрещивания и мутации для формирования новых особей на основе существующих и изменения существующей особи на месте, соответственно. Каждый маршрут имеет шанс быть изменённым вследствие мутации и принять участие в процессе скрещивания, эти операции не

зависят друг от друга, так что маршрут может быть подвергнут им обеим во время одной итерации алгоритма.

Авторы предлагают три возможные мутации, которые могут быть применены к маршрутам. В первом случае оператор мутации вставляет новую случайную точку в произвольное место существующего маршрута. Точка располагается в окрестности выбранной случайной точки, которая уже является частью маршрута. Этот вариант мутации позволяет маршруту обходить небольшие препятствия, смещая маршрут в сторону от них. Во втором случае, точка маршрута перемещается в пространстве на новое место. Этот вариант мутации также позволяет избегать небольших препятствий, однако при этом количество точек маршрута не меняется. Третий вариант мутации удаляет случайно выбранную точку маршрута, соединяя точки перед ней и после неё напрямую. Этот вариант мутации приводит к появлению протяжённых рёбер маршрута и уменьшению количества точек, тем самым упрощая маршрут. Когда маршрут оказывается выбран для мутации, к нему применяется случайно выбранный вариант мутации, при этом вероятность выбора всех вариантов одинакова. В результате мутации возможно появление непереходимого маршрута, однако в общем случае это не является проблемой, так как такой маршрут получит низкую оценку приспособления, и будет удалён из популяции в процессе селекции.

Когда несколько маршрутов оказываются выбраны для скрещивания, они объединяются в группы, и к каждой группе применяется оператор скрещивания. Количество особей в одной группе зависит от того, сколько особей требуется оператору мутации, в предлагаемом методе используются две особи, но это количество может быть увеличено. Исследования показывают, что, если особь является последовательностью некоторых более мелких сущностей, классический точечный оператор скрещивания может оказаться неприменим, так как в этом случае особи должны иметь общие фрагменты, что не всегда возможно [10]. Настоящая работа предлагает две разновидности оператора скрещивания маршрутов, которые являются обобщением оператора, предложенного в работе [10], для случаев, когда поиск пути выполняется не на основе графа. Первый вариант назван «ближнее скрещивание», а второй «дальнее скрещивание». В первом случае из маршрутов выбирается пара точек, которые принадлежат разным маршрутам, но расстояние между которыми минимально, то есть такие точки, где маршруты максимально сближаются. Во втором случае, расстояние между точками не учитывается, а из каждого маршрута выбирается произвольная точка. Каждый маршрут разделяется на две части в выбранной точке (до и после неё), после чего маршруты обмениваются вторыми частями. В результате применения оператора скрещивания, формируются два новых маршрута, а исходные маршруты сохраняются. Любая пара маршрутов имеет общие точки: точку начала движения и точку назначения. Скрещивание в этих точках не имеет смысла, как следствие, введено искусственное ограничение, и эти точки не могут быть выбраны для скрещивания.

Целью является формирование оптимального маршрута. Чтобы выбрать такой маршрут, генетический алгоритм использует функцию приспособления, которая оценивает каждый маршрут, и присваивает ему тем большую оценку, чем ближе он к оптимуму. В качестве оценки приспособления маршрута используется время прибытия в точку назначения, взятое с обратным знаком (благодаря чему меньшее по модулю значение, считается большим, чем большее по модулю значение). Использование времени прибытия вместо протяжённости маршрута вызвано тем, что судно может преодолеть больший маршрут за меньшее время, двигаясь с большей скоростью, чем более короткий маршрут, двигаясь с меньшей скоростью. Маршрут, по которому судно не может пройти, например, из-за недостаточной глубины, оценивается минимальным возможным значением и удаляется из популяции в процессе селекции.

Маршрут является довольно большой сущностью с точки зрения занимаемой памяти, как следствие, может оказаться невозможным разместить в памяти все маршруты. Кроме этого, в качестве недостатка генетических алгоритмов часто указывается преждевременная сходимость популяции к некоторому подмножеству решений, что приводит к тому, что решения оказываются похожи друг на друга, из-за чего эффективность генетического алгоритма снижается [7]. Для решения этих проблем предлагается использовать параллельный генетический алгоритм, реализующий модель островов. В случае модели островов, вся глобальная популяция разделяется на несколько независимых локальных популяций, которые обрабатываются отдельно друг от друга [2]. Использование параллельного генетического алгоритма повышает разнообразие особей популяции, так как разные генетические алгоритмы, выполняющиеся параллельно для решения общей задачи, могут быть сконфигурированы по-разному. Как следствие, становится возможным сократить количество особей в популяции, так как разнообразие достигается не за счёт размера популяции, а за счёт различий в конфигурации [3].

В работе [7] приводится описание параллельного генетического алгоритма, где популяция оказывается разделена на две части, а разница между популяциями выражается в методе выбора особей для скрещивания и мутации. Настоящая работа предлагает сделать практически все аспекты генетического алгоритма настраиваемыми, за исключением количества итераций алгоритма (с целью упрощения синхронизации программных потоков) и функции приспособления (чтобы сохранить возможность сравнения особей, принадлежащих к разным популяциям).

Таким образом, разные генетические алгоритмы, выполняющиеся одновременно и параллельно, могут иметь различные параметры, что, в свою очередь означает, что свойства особей, относящихся к разным популяциям, могут сильно отличаться. Как следствие, популяции, относящиеся к разным «островам», также могут быть подвергнуты скрещиванию между собой, для достижения ещё большего разнообразия в рамках всей глобальной популяции. При выполнении скрещивания разных популяций, популяции случайным образом

группируются, и выполняется скрещивание их особей. При скрещивании пары популяций, используется оператор скрещивания, относящийся к первой популяции; полученные в результате особи также добавляются к первой популяции; вторая популяция, в этом случае, выступает как «донор», предоставляя свои особи. При использовании оператора скрещивания, половина особей выбирается из первой популяции, половина из второй. Первая популяция пары выбирается последовательно, а вторая – случайным образом, в результате чего, во время сеанса межпопуляционного скрещивания, каждая популяция получает новые особи. Использование межпопуляционного скрещивания приводит к распространению разнообразия и полезных свойств по всей глобальной популяции [3].

Ранее было дано описание трёх методов выбора точек при формировании одного маршрута. В случае простого генетического алгоритма, использование всех трёх методов было бы затруднено, так как в этом случае пришлось бы выбирать, какой именно способ использовать при формировании очередного маршрута. В случае параллельного генетического алгоритма, разные алгоритмы, обрабатывающие разные «острова», могут использовать разные методы выбора промежуточных точек, в результате чего различие между особями, относящимися к разным популяциям, возрастает ещё сильнее.

**2. Демонстрация работы предлагаемого алгоритма**

В целях демонстрации предлагаемого алгоритма, было проведено его тестирование на нескольких тестовых картах глубин. Для тестирования работы предлагаемого алгоритма использовались синтетические карты, так как, во-первых, использование синтетических данных позволяет подготовить такие карты, которые требуют от алгоритма проявить все его возможности, во-вторых, даёт полный контроль над картой, и, в третьих, позволяет смоделировать сложные ситуации и проверить, как алгоритм может их обработать.

Для тестирования были выбраны две карты, одна из которых относительно небольшая, и предназначена для проверки способности алгоритма прокладывать маршрут, требующий активного маневрирования. Вторая описывает большую область, содержащую много мелких препятствий, представляющих острова. В обоих случаях, точка А на карте соответствует точке начала движения, а точка В – точке назначения. Изображения карт приведены на рисунках 4 и 5.



Рис. 4. Первая тестовая карта



Рис. 5. Вторая тестовая карта

Для каждой карты были проведены две группы тестов: в первом случае использовался простой генетический алгоритм, а во втором – параллельный. В случае параллельного генетического алгоритма, после каждых 100 поколений проводилось межпопуляционное скрещивание. В таблице 1 приведены результаты тестирования. Для каждой карты было выполнено несколько запусков алгоритма, с целью получения средних значений и сглаживания возможного разброса.

Таблица 1  
**Результаты тестирования алгоритма**

Карта	0.25 км <sup>2</sup>		400 км <sup>2</sup>	
Размер карты	0.25 км <sup>2</sup>		400 км <sup>2</sup>	
Количество параллельных ГА	1	4	1	4
Мин. длина маршрута, метры	1106.86	1025.73	26018.2	25314.7
Макс. длина маршрута, метры.	1247.45	1189.99	28451.1	26300.4
Средняя длина маршрута, метры.	1177.08	1127.69	26814.28	25709.92
Мин. время расчёта, сек.	<1	1	6	10
Макс. время расчёта, сек.	1	1	8	12
Среднее время расчёта, сек.	<1	1	7	10

Как видно из таблицы, в случае простой карты, не-параллельный генетический алгоритм показывает большую производительность, чем параллельный, в то же время, решение, найденное параллельным генетическим алгоритмом лучше, чем решение, найденное не-параллельным. Снижение производительности, вероятно, вызвано использованием межпопуляционного скрещивания. В случае сложной карты, не-параллельный алгоритм также показывает лучшую производительность, однако качество найденных решений невелико: лучшее решение, найденное не-параллельным

алгоритмом сопоставимо с худшим решением, найденным параллельным алгоритмом. Параллельный алгоритм также более стабилен: разница между лучшим и худшим решениями меньше, чем для не-параллельного. На рис. 6 и 7 приведены построенные в процессе тестирования маршруты.

Хотя при увеличении размеров карт и усложнении рельефа возможно снижение общей производительности алгоритма, это не выглядит серьезной проблемой. В настоящее время, наблюдается тренд по переносу сложных вычислений с бортовых систем на береговые, что позволяет использовать высокопроизводительные вычислительные системы для обслуживания нескольких судов одновременно [9].

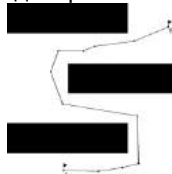


Рисунок 6. Первая тестовая карта с построенным маршрутом

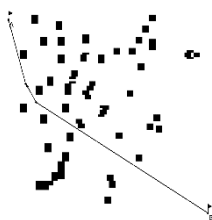


Рис. 7. Вторая тестовая карта с построенным маршрутом

### Заключение

В работе приводится описание двухкомпонентного генетического алгоритма, предназначенного для построения оптимального и безопасного маршрута судна. Предлагаемый алгоритм использует новый подход к построению отдельных маршрутов, а затем выполняет их оптимизацию с использованием параллельного генетического алгоритма. В отличие от классических алгоритмов поиска пути, предлагаемый алгоритм не требует предварительного построения графа или наложения сетки для получения узлов, на основе которых и выполняется поиск пути.

Предлагаемый алгоритм не учитывает гидродинамические особенности движения судна, влияние погодных условий, таких как приливно-отливные и локальные течения, а также волнения на движение судна. Также глубины области предполагаются постоянными. Учёт этих факторов при построении маршрута судна является предметом дальнейших исследований.

Использование предлагаемым алгоритмом функций приспособления для выбора отдельных точек маршрута и целых маршрутов позволяет налагать дополнительные ограничения на решения, в том числе динамически, в зависимости от конкретной ситуации.

### Литература

1. Войткунская А. Я., Звягин П. Н. Маршрутизация судна в дрейфующем льду // Морские Интеллектуальные Технологии. Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. – Vol. 2 (40) Т. 1. – 2018. – P. 166–172.
2. Скобцов Ю. А., Сперанский Д. В. Эволюционные вычисления. – Москва: Национальный открытый университет «Интуит», 2015. – P. 327.
3. Янчин И. А., Петров О. Н. Параллелизация генетического алгоритма при поиске пути // Сборник докладов «XIX Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям». – изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – Май. – P. 520–523.
4. Brie Alexandru Horia, Morignot Philippe. Genetic Planning Using Variable Length Chromosomes // Proceedings of the Fifteenth International Conference on International Conference on Automated Planning and Scheduling. – ICAPS'05. – AAAI Press, 2005. – P. 320–329. –
5. Sekmez Ugur, Ozsiganan Mustafa, Sahingoz Ozgur Koray. Multi-UAV Path Planning with Parallel Genetic Algorithms on CUDA Architecture // Proceedings of the 2016 on Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion. – GECCO '16 Companion. – New York, NY, USA : ACM, 2016. – P. 1079–1086.
6. Grifoll M., Martínez de Osés F. X., Castells M. Potential economic benefits of using a weather ship routing system at Short Sea Shipping // WMU Journal of Maritime Affairs. – 2018. – Jun. – Vol. 17, no. 2. – P. 195–211.
7. Hassani A., Treijs J. An overview of standard and parallel genetic algorithms // IDT workshop on interesting results in computer science and engineering. – 2009.
8. Lee C.-Y, Antonsson Erik. Variable Length Genomes for Evolutionary Algorithms. // Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO '00). – 2000. – 01. – P. 806.
9. Simonsen, Martin Hjorth. State-of-the-Art Within Ship Weather Routing / Martin Hjorth Simonsen, Erik Larsson, Wengang Mao, Jonas W. Ringsberg // ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. – 2015. – P. 11.
10. Qiongbing, Z. A new crossover mechanism for genetic algorithms with variable-length chromosomes for path optimization problems / Qiongbing Zhang, Lixin Ding. // Expert Systems with Applications. – 2016. – T. 60. – стр. 183-189.



## References

1. Voitkunskaia, A. Ja., Zvyagin, P. N. Marshrutizatsiya sudna v dreyfuyushchem l'du [A routing of a vessel in drifting ice]. Marine Intellectual Technologies. Proceedings of the Saint-Petersburg State Marine Technical University. 2 (40), 1, 2018. Pp. 166-172.
2. Skobtsov, Yu. A. and Speransky, D. V. Evolyutsionnye vychisleniya [Evolutionary computation]. Moscow: National Open University "Intuit". 2015. Pp. 327.
3. Yanchin, I.A., Petrov, O.N. Parallelizatsiya geneticheskogo algoritma pri poiske puti [Parallel Genetic Algorithms for Pathfinding]. Proceedings of 2016 XIX International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). 2016. Pp. 520-523.
4. Brie, A. H., and Morignot, P. Genetic Planning Using Variable Length Chromosomes. Proceedings of the Fifteenth International Conference on International Conference on Automated Planning and Scheduling. 2005. Pp. 320--329.
5. Cekmez, U., Ozsiginan, M., Sahingoz, O. K. Multi-UAV Path Planning with Parallel Genetic Algorithms on CUDA Architecture. Proceedings of the 2016 on Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion. 2016. Pp. 1079--1086.
6. Grifoll, M., Martinez de Oses, F. X., Castells, M. Potential economic benefits of using a weather ship routing system at Short Sea Shipping. WMU Journal of Maritime Affairs. 2018. 17(2). Pp. 195-211.
7. Hassani, A., Treijs, J. An overview of standard and parallel genetic algorithms. IDT workshop on interesting results in computer science and engineering. 2009.
8. Lee, C.-Y., Antonsson, E. Variable Length Genomes for Evolutionary Algorithms. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO '00). 2000.
9. Simonsen, M. H., Larsson, E., Mao, W., Ringsberg, J. W. State-of-the-Art Within Ship Weather Routing. ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2015.
10. Qiongbing, Z., Lixin, D. A new crossover mechanism for genetic algorithms with variable-length chromosomes for path optimization problems. Expert Systems with Applications. 2016. 60. Pp. 183-189.

УДК 629.058

## ТРЕТИЧНАЯ ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

**Константин Николаевич Звягин**магистр техники и технологии, начальник НИС «Разработка перспективного программного обеспечения»  
АО ВНИИРА192012 Санкт-Петербург, пр. Обуховской обороны, 120  
главный инженер проектаЦентр инновационных арктических технологий  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29  
e-mail: k.n.zvyagin@yandex.ru**Анна Ярославна Войткунская**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Прикладной математики и математического моделирования

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121 Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
старший научный сотрудникЦентр инновационных арктических технологий  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29  
e-mail: vanna@list.ru**Даниил Денисович Мальцев**

студент направления «Прикладная математика»

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121 Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: danymalcevthebest98@gmail.com

### Аннотация

Радиолокационные системы широко используются в авиации, судовождении и в других областях, где необходима высокая точность определения местоположения объекта в пространстве.

Для успешного обеспечения задач третичной обработки информации важно использовать надежные методы фильтрации сигналов движущихся объектов, снижающие влияние шумов и помех на информацию об «отметке» объекта.

Задачей настоящей работы является исследовать возможность применения математического аппарата вейвлет-преобразований для обработки радиолокационной информации, полученной в условиях, соответствующих местности расположения радиолокационных станций или многопозиционных систем наблюдения.

В статье для многоуровневой обработки дискретных сигналов применено вейвлет-преобразование Хаара. Описана алгоритмическая схема его использования. Рассмотрены примеры применения составленной компьютерной программы к разложению исходных сигналов от объектов, маневрирующих на плоскости, на низкочастотную и высокочастотную составляющие.

Сделан вывод о возможности использования вейвлет-преобразования Хаара для алгоритмов фильтрации высокочастотных шумов.

**Ключевые слова:** радиолокационная информация, вейвлет-преобразование Хаара, обработка сигналов.

## TERTIARY TREATMENT OF RADAR INFORMATION USING WAVELET TRANSFORM

**Konstantin N. Zvyagin**Master of Engineering and Technology, Head of the R / D "Advanced Software Development"  
JSC VNIIRA192012, St. Petersburg, Obukhovskoy oboroni, 120  
Chief Project EngineerCenter for Innovative Arctic Technologies  
St. Petersburg Polytechnic University named after Peter the Great,  
195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29;  
e-mail: knzvyagin@yandex.ru**Anna Ya. Voitkunskaia**PhD in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics  
St. Petersburg State Marine Technical University,  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
Chief Researcher

Center for Innovative Arctic Technologies  
St. Petersburg Polytechnic University named after Peter the Great,  
195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29;  
e-mail: vanna@list.ru

**Daniil D. Maltsev**

Student in the area of "Applied Mathematics"  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: danymalcevthebest98@gmail.com

### Abstract

Radar systems are widely used in aviation, navigation and in other areas where high accuracy is required to determine the location of an object in space.

To successfully support the tasks of tertiary information processing, it is important to use reliable methods of moving objects filtering signals, reducing the influence of noise and interferences from information on the radar position symbol ("mark") of an object.

The objective of this work is to investigate the possibility of using the mathematical apparatus of wavelet transforms for processing radar information obtained under conditions that correspond to the location of radar stations or multi-position surveillance systems.

The Haar wavelet transform was applied to multi-level processing of discrete signals in this article. The algorithmic scheme of its use is described. The examples of application of the compiled computer program for decomposition of the original signals from objects that are maneuvering on the plane into low-frequency and high-frequency components are reviewed.

The conclusion is made about the possibility of using the Haar wavelet transform for high-frequency noise filtering algorithms.

**Keywords:** radar information, Haar wavelet transform, signal processing.

### Введение

Радиолокационные системы (РЛС) широко используются в авиации, судоходстве и в других областях, где необходима высокая точность определения местоположения объекта в пространстве. Результатом наблюдения за объектом с помощью РЛС могут быть его местоположение, высота над уровнем моря, курс, скорость и другие параметры объекта, вычисляемые или получаемые.

В последнее время активно развивается новый тип средств наблюдения: многопозиционные системы наблюдения (МПСН). В классических РЛС применяются методы обнаружения объекта, основанные на работе направленной антенны в режимах запроса/ответа или получения отраженного сигнала. МПСН отличаются от классических РЛС тем, что вычисляют позицию объекта по разнице времен прихода сигнала с борта объекта и используют неподвижные компактные приемные станции. Сигнал с борта объекта может отправляться широкоэшелонной передачей или быть инициирован запросом с МПСН.

При вычислении позиции объекта по разнице времен координатная информация получается с точностью, не уступающей по качеству традиционным РЛС. Однако из-за наличия погрешностей в измерениях траектория объекта, сформированная МПСН, не годится для отображения на индикаторе диспетчера наземной станции и требует предварительной обработки и подавления помех.

Обработка радиолокационной информации (РЛИ) состоит из следующих этапов [6]:

- первичная обработка – происходит обнаружение объекта и измерение его координат;
- вторичная обработка – определяются параметры траектории движения объекта по сигналам одного или нескольких РЛС, МПСН;

- третичная обработка – сопоставляются данные, полученные от разных источников, для улучшения качества построения трассы объекта.

На этапе вторичной обработки информации (ВОИ) происходят автоматический захват и сопровождение траекторий объектов отдельно для каждого радиолокационного комплекса, среди которых находится и МПСН.

На этом этапе траекторной обработки РЛИ осуществляются следующие действия:

1. по сигналам, полученным за несколько обзоров РЛС («отметкам»), определяются параметры траектории движения объекта, такие как скорость, курс, ускорение, а также осуществляется «завязывание» траектории – ее инициализация;

2. производится экстраполяция «отметок» – выделяется фрагмент пространства, в котором вероятно появление «отметки» объекта в следующем обзоре РЛС;

3. после получения сигнала следующего обзора РЛС производится сравнение экстраполированных координат с вновь полученными координатами движущегося объекта и рассчитывается «невязка» (разница между предсказанным положением объекта и возможным фактическим местоположением);

4. выполняется привязка новой «отметки» – очередного сигнала от РЛС – к траектории объекта для построения продолжения этой траектории. Например, обрабатываются ситуации, когда включилось в работу новое РЛС или в зону видимости РЛС вошел новый объект.

На практике из-за того, что зоны обзора РЛС или зоны ответственности постов наблюдения обычно перекрываются, «отметки» от одного и того же объекта могут поступать одновременно от нескольких станций. Теоретически такие «отметки» должны накладываться одна на другую. Однако на

практике этого не наблюдается из-за систематических и случайных ошибок в измерении координат, различного времени локации, а также из-за ошибок пересчета координат между точками расположения источника и приемника информации. Поэтому возникает необходимость в третичной обработке информации.

Главной задачей третичной обработки (ТОИ) является решение вопроса: сколько объектов находится в действительности в зоне ответственности. Для решения этой задачи необходимо выполнить следующие операции:

- собрать донесения от разных источников, привести «отметки» к единой системе координат и единому времени отсчета;
- установить принадлежность «отметок» к объектам, то есть решить задачи кластеризации и отождествления их «отметок»;
- выполнить объединение информации: для электронной системы слежения должно иметься понятие достоверного источника РЛИ и системного номера трека;
- при этом параллельно выполняется накопление статистической информации для повышения дальнейшего качества работы ТОИ.

Для успешного обеспечения задач третичной обработки информации важно использовать надежные методы фильтрации сигналов движущихся объектов, снижающие влияние шумов и помех на информацию об «отметке» объекта. Для этого широко применяется фильтр Калмана [3]. Тем не менее, погрешности в нем моделируются с помощью «белого шума», который адекватно описывает не все встречающиеся в практике случаи зашумления [5]. Кроме того, отождествление «отметок» об объекте, полученных после такой фильтрации, может вызывать алгоритмические трудности из-за неопределенностей, появляющихся при некоторых видах взаимного расположения движущихся объектов или при неожиданном маневре одного объекта, ввиду линейности модели фильтра. При слежении за маневрирующим объектом особое значение приобретают моменты начала и конца маневра.

В связи с этим имеются попытки более или менее успешного применения к обработке РЛИ других методов фильтрации сигналов. Например, в [4] применена фильтрация с несколькими параллельными разрешениями.

### 1. Метод, примененный при третичной обработке информации

В настоящей работе проанализирована возможность использования математического аппарата вейвлет-анализа, развитого в работах [1], [2], [4], к некоторым частным видам сигналов, соответствующим определенному набору маневров объектов.

Наиболее простым видом вейвлетов является вейвлет-функция Хаара  $\psi(x)$ , которую можно использовать для анализа одномерного сигнала, распространяющегося вдоль горизонтальной оси  $Ox$ , [2]. Этот «материнский» вейвлет задается следующим образом:

$$\psi = \begin{cases} 0 & \text{при } x < 0 \text{ и } x \geq 1, \\ +1 & \text{при } 0 \leq x < 0.5, \\ -1 & \text{при } 0.5 \leq x < 1. \end{cases} \quad (1)$$

Непрерывный одномерный сигнал, излучаемый объектом, при использовании РЛС и МПСН приходит к месту его обработки в виде дискретных значений – «отметок» через определенные промежутки времени, в соответствии с параметрами работы конкретного радиолокационного устройства. Именно применение вейвлета Хаара имеет в этом случае преимущество: для обработки оказывается достаточным получить ровно две последовательных «отметки», что обеспечивает минимальную задержку в канале обработки РЛИ.

Практической задачей настоящей работы является исследовать возможность применения такого вейвлета при обработке РЛИ, полученной в условиях, соответствующих местности расположения МПСН. В работе рассмотрены разные типы маневров объектов, движущихся в или на некоторой плоскости. Считается, что сигналы с имеющимися локальными особенностями достаточно эффективно исследуются именно с помощью преобразования Хаара [2].

Так как в задачах обработки РЛИ исходный сигнал поступает на обработку уже в дискретном виде, то проблемы, связанные с выбором нужного шага дискретизации, решать не приходится: временные промежутки между «отметками» определены техническими характеристиками физического устройства. Кроме того, сигнал можно считать бесконечным: «отметки» поступают на обработку во все время работы конкретного РЛ, что позволяет избежать усложнения алгоритма обработки вблизи границ конечных сигналов.

Пусть РЛИ поступает в виде бесконечного дискретного сигнала – последовательности «отметок»  $s = \{s_j, \text{ номер «отметки» } j = 1, 2, 3 \dots\}$ . Каждым двум соседним «отметкам» исходного сигнала  $s_{2k}$  и  $s_{2k-1}$  на следующем уровне обработки  $i$  ( $i = 1, 2, 3 \dots$ ) поставим в соответствие пару новых сигналов  $v_i = \{v_{j,i}, \text{ номер «отсчета» } j = 1, 2, 3, \dots\}$  и  $w_i = \{w_{j,i}, \text{ номер «отсчета» } j = 1, 2, 3, \dots\}$ , дискретные значения которых («отсчеты») будем вычислять по формулам:

$$v_{j,i} = \frac{s_{2k-1} + s_{2k}}{2}, \quad w_{j,i} = \frac{s_{2k} - s_{2k-1}}{2}. \quad (2)$$

Здесь индекс  $k = 1, 2, 3, \dots$  нумерует пары «отметок». Видно, что на первом уровне обработки ( $i = 1$ ) для каждого из новых сигналов  $v$  и  $w$  получится вдвое меньше «отсчетов», чем поступило на обработку «отметок» исходного сигнала.

При накоплении на первом уровне обработки двух очередных «отсчетов» для  $v_1$  ( $i = 1$ ), можно получить по формулам (2) «отсчеты»  $v_2$  и  $w_2$  второго уровня обработки ( $i = 2$ ), если в числителях этих формул использовать вместо сигнала  $s$  сигнал  $v_1$ , и так далее. При этом очередной уровень обработки будет содержать информацию, обработанную с низкочастотным фильтром более высокого порядка. Схема предложенного автора в данной работе расчетного алгоритма продемонстрирована на рис.1.

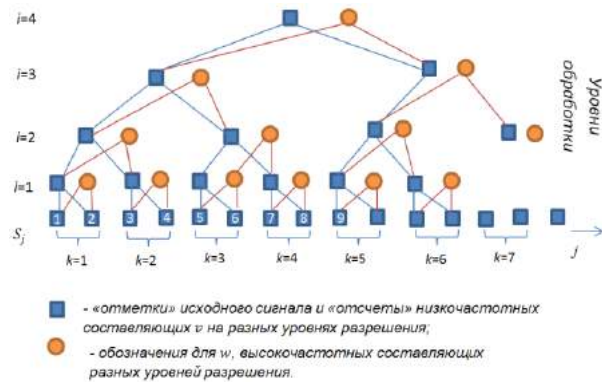


Рис. 1. Схема расчетного алгоритма для нескольких начальных уровней обработки

Первую составляющую  $v$  традиционно называют низкочастотной, а вторую  $w$  – высокочастотной. Это преобразование эквивалентно свертке исходного сигнала с фильтром  $[0.5, 0.5]$  для низкочастотной составляющей, и с фильтром  $[-0.5, 0.5]$  для высокочастотной. Совокупность «отметок» для составляющей  $v$  можно рассматривать как результат работы фильтра по исходному сигналу на первом уровне обработки. А совокупность «отметок» для составляющей  $w$  трактуется, как выделенный на первом уровне обработки шум. Шум обычно принимает случайные значения в сравнительно небольшом диапазоне в окрестности нулевой величины исследуемого параметра объекта до тех пор, пока объект не начинает совершать маневр. При возникновении маневра момент его начала может трактоваться расчетным алгоритмом как увеличение шума.

На рис. 1 видно, что получающаяся структура обработки входного сигнала соответствует структуре идеально сбалансированного двоичного дерева, количество узлов в каждом левом поддереве которого равно количеству узлов в соответствующем правом поддереве. Поддеревья более низких уровней обработки начинают соединяться между собой в более крупные поддеревья, когда поступившее количество исходных сигналов достигает необходимой кратности числа 2. Например, правый фрагмент на рис. 1 соединится с левым фрагментом только на четвертом уровне обработки, когда поступит шестнадцатая «отметка» исходного сигнала.

Поэтому в алгоритме для обеспечения быстродействия предусмотрено начало обработки каждой новой «отметки» исходного сигнала по мере ее поступления, что соответствует постепенному росту и формированию правых поддеревьев структуры фильтрации.

Эта многоступенчатая процедура прямого преобразования Хаара была использована в работе для анализа траекторий объектов, совершающих характерные маневры. Составлена компьютерная программа обработки в среде Qt.

**2. Примеры результатов применения метода**

Приведем некоторые результаты для случаев движения объектов в горизонтальной плоскости.

Рассмотрим объект №1, наблюдаемый МПСН, который изначально с замедлением движется по

прямолинейному участку своего маршрута, а в дальнейшем – совершает повороты в плоскости движения. В наблюдениях присутствует шум от радиолокатора. На представленных далее графиках показаны «отметки», полученные МПСН. Так как количество этих «отметок» в выбранном временном диапазоне составляет порядка 600 штук, то на представленных графиках набор соответствующих точек визуально выглядит как сплошная кривая, хотя он является дискретным набором точек. Отметим также, что на всех представленных далее рисунках по оси абсцисс отложено время  $t$  наблюдения в секундах, по оси ординат – курс объекта относительно истинного Севера в угловых градусах (возможные пределы его изменения: от 0 до 360).

На графике записи курсового угла (рис. 2.) различим маневр на плоскости – изменение курса объекта с характерными погрешностями наблюдения.

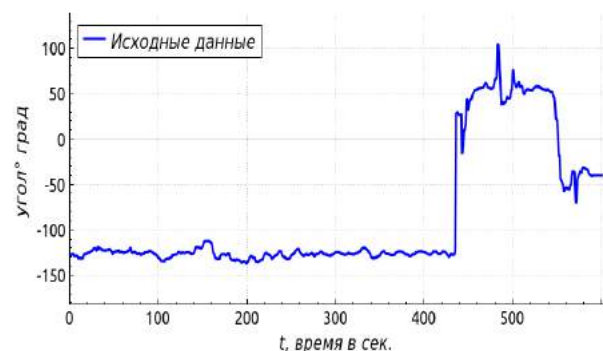


Рис. 2. Исходная запись курсового угла объекта №1

На рис. 3 показаны представляющие наибольший интерес уровни высокочастотного сигнала  $w_{j,i}$  ( $i = 2, i = 3$ ), на которых видно поведение этого сигнала в период маневра объекта. Отметим, что на этом рисунке и далее величины обработанных сигналов масштабированы для того, чтобы их можно было разместить на том же поле, что и исходный сигнал в целях выявления качественной картины. Масштабная шкала для исходного сигнала размещена в левой части рисунков, а для результатов обработки – в правой части рисунков.

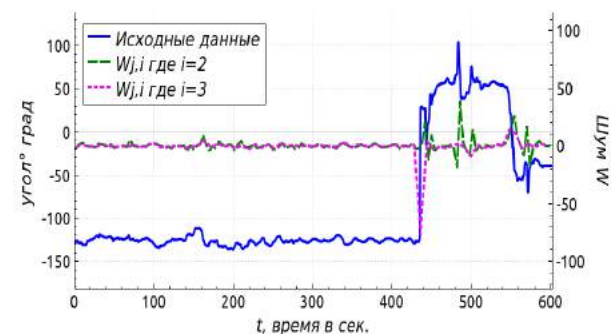


Рис. 3. Запись курсового угла объекта №1, совмещенная с масштабированными результатами обработки  $w_{j,i}$

На рис. 4 представлены различные уровни обработки низкочастотного сигнала  $v_{j,i}$  ( $i = 1, i = 3$ ). Видно, что для данного объекта и способа его маневрирования наиболее подходящим для отображения является  $v_{j,1}$ . При нем задержка информации в тракте обработки РЛИ минимальна.

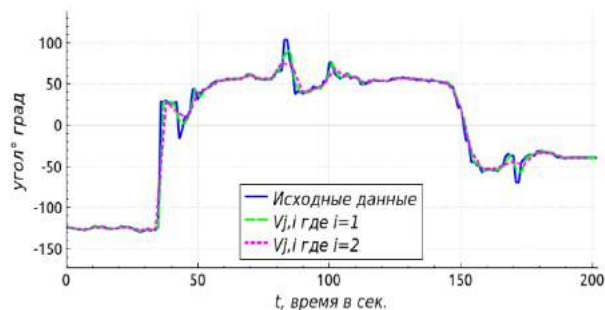


Рис 4. Запись курсового угла объекта №1, совмещенная с масштабированными результатами обработки  $v_{j,i}$  (фиолетовая и зеленая линии сливаются на значительном протяжении)

На рис. 5 представлены результаты многоступенчатого применения вейвлет-преобразования Хаара к другому маневрирующему объекту (№2), движущемуся на плоскости с ускорением и с поворотами. Повороты различных видов для этого объекта уверенно прослеживаются на различных уровнях  $w_{j,i}$  ( $i = 2, i = 3$ ). Это позволяет рекомендовать, для более достоверного определения моментов начала и окончания

маневров, анализировать результаты нескольких последовательных уровней обработки исходного сигнала с помощью вейвлет-преобразования Хаара.

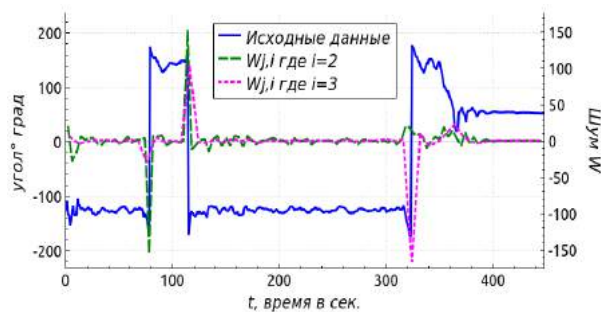


Рис. 5. Полученные при обработке графики  $w_{j,i}$  масштабированы пропорционально и наложены поверх графика курса объекта №2

### Выводы

В работе показано, что применение фильтра на основе вейвлет-преобразования Хаара для обработки РЛИ, поступающей от МПСН, возможно использовать для фильтрации высокочастотного шума, а в дальнейшем – и для анализа характеристик маневрирования наблюдаемого объекта. Следует отметить, что построенный в работе алгоритм относится к полиномиальному классу по вычислительной сложности. Вычислительные затраты и объемы компьютерной памяти у него меньше, чем при использовании матричных преобразований фильтра Калмана.

### Литература

1. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам/ Москва, Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 464с.
2. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов/ М.: Мир, 2005, 671с.
3. Калман Р.Э. Идентификация систем с шумами/ Успехи математических наук, т. 40, вып. 4,244, 1985, с. 27-41.
4. Lang Hong Multiresolutional Distributed Filtering / IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 39, no. 4, April 1999, p. 853-856.
5. Фокин Л.А., Ширяев В.И., Подивилова Е.О. Об анализе погрешностей интегрированной навигационной системы и методах их оценивания./ Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника, вып. 17, 2012, с. 127-134.
6. Панасюк Ю.Н., Пудовкин А. П. Обработка информации в радиотехнических системах/ Тамбов, Издательство ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016, 83с.

### References

1. Daubechies I.: Ten Lectures on Wavelets/ SIAM, 1992, 357p.
2. Mallat S.G.: A Wavelet Tour of Signal Processing: the sparse way. Academic Press, 1998, 3rd edn. 2009, 832p.
3. Kalman R.E.: A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering, 82, Series D, 1960, p.35-45.
4. Lang Hong Multiresolutional Distributed Filtering. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 39, no.4, April 1999, p.853-856.
5. Fokin L.A., Shirayev V.I., Podivilova Ye.O. Ob analize pogreshnostey integrirovannoy navi-gatsionnoy sistemy i metodakh ikh otsenivaniya. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika, vyp.17, 2012, p.127-134. [In Russian].
6. Panasyuk YU.N., Pudovkin A. P. Obrabotka informatsii v radiotekhnicheskikh sistemakh. Tambov, Izdatel'stvo FGBOU VO «TGTU», 2016, 83p. [In Russian].

УДК 004.9:629.5

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ СУДОВОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Александр Олегович Воропаев**

Ассистент, Кафедра сварки судовых конструкций  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: voropayev@corp.smtu.ru

**Артём Викторович Горбунов**

студент магистр, Кафедра строительной механики корабля  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: gorart95@mail.ru

### Аннотация

Работа посвящена применению топологической оптимизации в судостроении. В статье даны результаты аналитического обзора наиболее распространённых средств программного обеспечения, позволяющих производить оптимизацию топологии конструкций. Отмечается, что эта дополнительная функция сейчас доступна в продуктах всех крупнейших мировых разработчиков, что явно указывает на то, что спрос на развитие топологической оптимизации неуклонно растёт. Рассматривается возможность применения топологической оптимизации для различных изделий судового машиностроения, а также целесообразность внедрения. Приводится описание методики оптимального проектирования конструкций, включающей активное применение компьютерных технологий (CAD/CAE/CAO/CAM), в сравнении с общепринятым подходом к проектированию, опирающимся на опыт и интуицию конструктора. Делается вывод о том, что топологическая оптимизация должна стать активным инструментом при оптимальном проектировании, поскольку позволяет предсказать, как качественно по распределению жёсткости должен выглядеть элемент конструкции для удовлетворения всем заданным ограничениям при воздействии известных эксплуатационных нагрузок.

**Ключевые слова:** топологическая оптимизация, средства программного обеспечения, методика проектирования, изделия судового машиностроения.

## ANALYTICAL RESEARCH OF THE POSSIBILITY TO APPLY MODERN TOPOLOGICAL OPTIMIZATION MEANS FOR SHIP'S ENGINEERING PRODUCTS

**Alexander O. Voropaev**

Assistant  
Department of Ship's Structures Welding  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: voropayev@corp.smtu.ru

**Artyom V. Gorbunov**

Master's student  
Department of Structural Ship Mechanics of St. Petersburg State Maritime  
Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: gorart95@mail.ru

### Abstract

The work is devoted to application of topological optimization in shipbuilding. The article presents the results of an analytical review of the most common software tools that allow optimization of the structures topology. It is noted that this additional feature is now available in the products of all the world's largest developers, which clearly indicates that the demand for the development of topological optimization is steadily increasing. The possibilities of using topological optimization for various products of shipboard engineering, as well as the feasibility of implementation, are reviewed. A description of the methodology for the optimal structural design, including intensive application of computer technology (CAD / CAE / CAO / CAM), is given in comparison with the generally accepted design approach, based on the experience and intuition of the designer. It is concluded that topological optimization should become an active tool for optimal design engineering, since it allows predicting how the structural element should look like in rigidity distribution (in quality attributes) to meet all specified constraints when exposed to known operational loads.

**Keywords:** topological optimization, software tools, design methodology, ship's engineering products.



**Введение**

Топологическая оптимизация постепенно входит в практику проектирования силовых конструкций. Суть ее состоит в том, что в габариты, отведенные под деталь, вписывается непрерывная упругая среда с изменяющимся по объему модулем упругости и плотностью. На основе результатов расчета напряженно-деформированного состояния, программа определяет места, где можно удалить материал. Таким образом, в модели остаются только элементы, передающие усилия наиболее рациональным образом.

В отличие от традиционной оптимизации топологическая оптимизация не требует указания независимых переменных оптимизации в явном виде. В топологической оптимизации параметром оптимизации является функция распределения материала по объему конструкции. Таким образом, основной особенностью задач оптимизации топологии является то, что область проектирования известна заранее, и она фиксирована в процессе оптимизации, а переменная проектирования является сама форма [1]. В последние два десятилетия топологическая оптимизация стала активным полем для исследований. Это привело к мультидисциплинарности современных методов топологической оптимизации и использованию их при решении задач не только механики твердого тела, но и гидроаэродинамики, и теплодинамики.

В настоящее время известны следующие методы топологической оптимизации: SIMP, ESO и BESO, Level-Set, Hyper Radial Basis Function Networks, Genetic Algorithms и их различные комбинации [2, 7]. Перечисленные методы, различаясь представлением объекта, набором варьируемых параметров структуры и алгоритмом оптимизации, всегда используют КЭ-анализ деформаций и тот или иной критерий оптимальности. Две техники — простая и вычислительно малозатратная BESO, а также несколько более математически строгая SIMP — сегодня активно конкурируют. Они были реализованы во многих коммерческих пакетах и стали широко применяться в современной индустрии.

Отдельной задачей является переход от конечно-элементной модели топологической оптимизации к геометрии реальной детали. Далее существуют два пути: интерпретация результатов под использование традиционных технологий производства, либо «прямое» изготовление тел с переменной плотностью методами аддитивных технологий.

Результат топологической оптимизации — снижение веса объекта при сохранении исходной прочности. Именно поэтому такие решения чаще используют в сферах, где важно сэкономить каждый грамм. Судостроение имеет все основания считаться таковой, поскольку экономия массы приводит к одному из двух преимуществ: либо позволит более эффективно использовать внутренний объем и устанавливать дополнительное оборудование и более мощные силовые установки без повышения водоизмещения, либо судно станет легче, что положительно скажется на скорости хода и расходе топлива [5].

**1. Анализ программных комплексов, способных проводить топологическую оптимизацию**

На рынке присутствует значительное количество программных продуктов, посредством которых возможно производить расчеты по топологической оптимизации. Помимо «тяжелого» промышленного ПО, существуют решения, отличающиеся меньшей функциональностью, более низким порогом вхождения и сравнительно доступной стоимостью. В последние годы наблюдается тенденция — стали выпускаться пакеты программ, в которых топологическая оптимизация вместо дополнительной опции приобретает статус самостоятельной дисциплины.

В рамках проведенного обзора можно заключить, что из 14 рассмотренных программных комплексов 4 являются продуктами компании Dassault Systems, и по 2 — продуктами Siemens PLM, Autodesk и Altair Group. Остальные разработчики представлены в рамках этой работы одной программой. Результаты отображены в таблице 1 ниже

Таблица 1

**Сводные данные по рассмотренным программным комплексам**

Название	Разработчик	Ориентирован о на оптимизацию	Облачное решение	Анизотропия	Аддитивное производство	Традиционное производство	Отличительны е особенности
ANSYS	Ansys Inc	-	-	+	-	+	Space Claim Direct Modeler; Stop Solution
Creo	PTC	-	-	-	+	+	Дополненная реальность (AR); связь с Autodesk Inventor; Creo Collaboration
NX	Siemens PLM	-	-	+	-	+	Взаимодействие в CAD-сборке; Convergent Modeling; формат Parasolid
Netfabb Ultimate	Autodesk	-	-	-	+	-	Project DreamCatcher; связь с Autodesk PowerMill и Autodesk FeatureCAM
SolidThinking Inspire	Altair Group	+	-	-	+	-	PolyNURBS Fit Tool; lattice/cell structures
COMSOL	Comsol Group	-	-	+	-	-	SIMP и Level-Set; LiveLink
SolidEdge	Siemens PLM	-	+	-	+	-	Синхронная технология; Конвергентное моделирование

Altair Optistruct	Altair Group	+	-	+	+	-	Hyper Mesh; SIMP; lattice/cell structures
SolidWorks	Dassault Systems	-	+	+	-	-	ядро CGM; SW Manage; SW Simulation
Catia3D Experience	Dassault Systems	-	+	+	+	+	104 роли (модуля); Function Driven Generative Designer
APM Structure	HTЦ «АPM»	-	-	+	+	+	Отечественная разработка, GPU (CUDA); формат STEP
Simulia Tosca	Dassault Systems	+	-	-	-	-	Optimality Criteria; controller-based algorithm
Fusion 360	Autodesk	-	+	+	-	+	HSM Ultimate; AnyCAD
Abaqus	Dassault Systems	-	-	+	-	-	BESO; Sensebased \ Constraintbased

Анализ возможностей демонстрирует значительный разброс функционала рассматриваемого программного обеспечения, что затрудняет сравнение возможностей пакетов между собой (рис.1). Отдельно выделены программные комплексы, основной целью которых является топологическая оптимизация. Малая часть программ использует дополнительные вычислительные мощности облачных технологий для выполнения трудоемких задач. Большинство продуктов поддерживают расчёт анизотропных материалов. Кроме того, стоит отметить различие в возможностях постобработки модели: часть ПО больше ориентировано на традиционное производство, другая – на аддитивные технологии, а некоторые поддерживают возможность выбора между этими двумя вариантами. Назвать простыми для освоения и финансово доступными большинство описанных программных продуктов сложно. Но есть и более простые решения, например — solidThinking Inspire. Можно предположить, что в ближайшем будущем, со снижением стоимости оборудования и расходных материалов для печати металлами и инженерными пластиками, сравнительно несложные средства топологической оптимизации получат более широкое распространение.

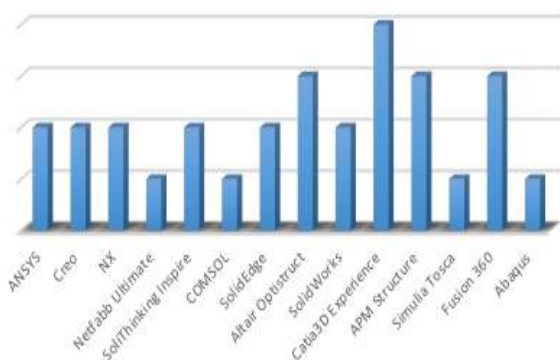


Рис. 1. Диаграмма сравнения возможностей средств ПО, позволяющих осуществлять топологическую оптимизацию

**2. Методика оптимального проектирования**

В рамках условно традиционного подхода алгоритм проектирования выстраивается следующим образом (рис. 2). Инженер-конструктор, исходя из своего многолетнего опыта разработки и собственной интуиции, учитывая эксплуатационные нагрузки и ограничения, придумывает исходную концепцию будущего изделия. Далее, с помощью оцифровки, эта конструкция превращается в CAD-модель, по которой впоследствии создаётся прототип изделия. Прототип подвергается натурным испытаниям, в то время как параллельно создаётся расчётная CAE-модель будущей конструкции, которая верифицируется путём сравнения с результатами натурных испытаний прототипа. CAE-модель также может использоваться для тех случаев нагружения, которые в натурных испытаниях воспроизвести не удаётся. В некоторых случаях, расчётная CAE-модель используется для создания прототипа. В случае неудовлетворения некоторым ограничениям, в том числе технологическим, модель возвращается конструктору на переработку, вместе с рекомендациями по модификации [4]. Именно этой связкой CAD\CAE инженерных систем и ограничивается общепринятый сегодня подход к проектированию. Очевидно, что такой подход опирается в основном на опыт и интуицию специалистов конструкторского профиля.



Рис. 2. Алгоритм условно традиционного подхода к проектированию

Методика оптимального проектирования (рис.3) предполагает, что на входе инженер работает только с компоновочным объёмом и требуемыми к изделию характеристиками для конкретных эксплуатационных режимов. Далее с помощью применения компьютерных технологий (CAD\CAE\CAO\CAM), конструктор получает компьютерную модель изделия, которое качественно удовлетворяет всем заданным эксплуатационным, а также технологическим ограничениям.

Однако для реализации предлагаемой в данной работе методики оптимального проектирования конструкций порядок использования инженерных систем должен быть реорганизован. В основу разработки концепции конструкции должны быть положены методы топологической оптимизации. А это предполагает значительное использование CAO-систем, которые в традиционном подходе к проектированию либо не используются вовсе, либо играют лишь вспомогательную роль.

Задачу организации проектирования призваны решить PDM-системы (Product Data Management), однако их использование на отечественных предприятиях, как правило, ограничено хранением и обновлением CAD-моделей и сопутствующей им документации. Стоит отметить, что решение, полученное с помощью оптимизационных технологий, зачастую оказывается существенно отличающимся от того варианта, которую предложил бы для такого изделия инженер-конструктор, пользуясь исключительно опытом проектирования и интуицией [6,8]. В статье [3] автор, на примере отрасли самолетостроения, рассуждает о двух парадигмах в области проектирования.

Сформулированная методика является сравнительно общей, так как техническая реализация каждого пункта зависит от набора программного обеспечения и конкретной решаемой задачи. Однако, несмотря на общность, предлагаемая методика позволяет выявить ключевые этапы процесса оптимального проектирования конструкций.



Рис. 3. Методика оптимального проектирования

**1. Оценка возможности и целесообразности применения топологической оптимизации для изделий судового машиностроения**

Как уже было упомянуто выше, одна из главных задач топологической оптимизации — снижение веса объекта при сохранении (или даже увеличении) исходной прочности. Критерий минимума массы является вполне естественным в задачах оптимизации, так как обуславливает простую и понятную по структуре функцию цели, обладающей хорошей чувствительностью к переменным проектирования. Свойства конструкций минимальной массы вполне устойчивы и мало зависят от особенностей судостроения [5]. Не менее важной задачей является экономия материалов, в особенности дорогостоящих, таких как сложные сплавы и редкие металлы. Такие материалы в силу их высокой стоимости используются нечасто и только там, где это действительно необходимо, поэтому в количественном отношении топологическая оптимизация выгоды не принесёт. Но эта же дороговизна материала является причиной, по которой оптимизация всего лишь нескольких деталей на судне может принести существенную экономию средств.

Исходя из упомянутого выше, изделия судового машиностроения стоит разделить на две группы: 1) массовые изделия, которые применяются широко и

мало зависят от типа судна; 2) судовые механизмы, которые изготавливаются и поставляются под определённые запросы и спектры применения. В случае рассмотрения первой группы получаем ситуацию: оптимизировав сравнительно небольшое и лёгкое изделие, общее число которых на судне может достигать нескольких десятков или сотен, в рамках целого судна можно получить заметный выигрыш в весе. Однако для массовых изделий важна универсальность и простота применения, определяющие широкий спектр использования компонентов. Если же говорить об изделиях из второй группы, то здесь мы чаще сталкиваемся с большими габаритами и весами, так что оптимизация одного-двух изделий может дать значительный выигрыш, как в весе, так и в экономии материалов. Однако оптимизация подобных конструкций должна проводиться при условии абсолютной надёжности — наиболее важного требования к любой конструкции. Причём можно оптимизировать как массивный корпус оборудования, так и фундамент, на котором оно располагается.

Тем не менее, всё зависит от того, какие именно результаты оптимизации будут получены для каждого конкретного изделия. И будет ли это возможно и выгодно с технологической и экономической точек зрения.

### Заключение

В числе наиболее актуальных в настоящее время проблем – автоматизация всего процесса проектирования. Действующие в России судостроительные нормативы во многом по-прежнему ориентированы на проектирование на бумаге. Автоматизированное оптимальное проектирование значительно улучшит качество проектных разработок, но в то же время увеличит объёмы вычислений. Методика проектирования должна включать в себя большое количество процедур оптимизации, что позволит маневрировать между желаемой математической строгостью и необходимостью получения приемлемого результата в пределах вычислительных ресурсов.

На основании проведённой работы можно сделать следующие выводы. Во-первых, топологическая оптимизация, безусловно, должна стать одним из основных инструментов при оптимальном проектировании, поскольку позволяет предсказать, как качественно по распределению жёсткости должен выглядеть элемент конструкции для удовлетворения всем заданным ограничениям при воздействии известных эксплуатационных нагрузок.

Причём управляющий этим процессом проектировщик должен иметь возможность корректировать значения параметров конструкции. Во-вторых, программное обеспечение многих ведущих мировых и отечественных разработчиков на сегодняшний день позволяет проводить расчёты по топологической оптимизации на достаточно высоком уровне. Для повышения эффективности процесса проектирования постоянно совершенствуются расчётные модели, создаются гибкие средства обработки входной информации и средства анализа результатов проектирования. В-третьих, несмотря на существенные отличия от отраслей промышленности, где этот процесс уже идёт полным ходом, внедрение топологической оптимизации в судостроение является целесообразным и может привести к значительной экономической выгоде. В обозримом будущем дальнейшее внедрение топологической оптимизации даст возможность интегрировать программные средства в единую систему, упростит процесс обмена данными в процессе проектирования, сократит время работы специалистов, устранил риск критических ошибок, что позволит повысить качество изготовления, надёжность и безопасность судов.

### Литература

1. Bendsøe M. P., Sigmund O. Topology optimization: theory, methods, and applications. — Springer, Berlin, Germany, 2003, 376 p.
2. Башин К.А., Торсунов Р.А., Семенов С.В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2017. № 51. – ПНИПУ, 2017, с.51,
3. Комаров, В. А. Точное проектирование // Онтология проектирования, 3 (5), 2012, с. 8 - 23
4. Конотоп, Д.И. Оптимальное проектирование сложных технических объектов с использованием онтологического подхода / Д. И. Конотоп, В. П. Зинченко//Онтология проектирования, 2011, с. 44-53
5. Родионов А.А. Математические методы оптимального проектирования судовых конструкций. Л.: Судостроение. 1990
6. Симсон Э. А. Оптимизация в проектировании: теории и приложения / Э. А. Симсон, С. А. Назаренко // Инфиз: очерки истории творчества. — Харьков : ЭнергоКлуб Украины, 2005. 329–345.
7. Сысоева В.В., Чедрик В.В. Алгоритмы оптимизации топологии силовых конструкций // Ученые записки ЦАГИ. – 2011. – Т. XLII, № 2. – С. 91–101.
8. Троицкий А.В. Проектирование конструкций максимальной жесткости методами топологической оптимизации // Естественные и технические науки. - М: Спутник плюс. - 2006. - № 3. - С. 199 - 202.

### References

1. Bendsøe M. P., Sigmund O. (2003). Topology optimization: theory, methods, and applications. Springer, Berlin, Germany, 376 p.
2. Bashin K.A., Torsunov R.A., Semenov S.V. (2017). Metody topologicheskoy optimizatsii konstruktсий, primenyayushchiesya v aerokosmicheskoy otrasli. Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika. № 51.
3. Komarov, V. A. (2012). Tochnoe proektirovanie. Ontologiya proektirovaniya, 3 (5), 8 – 23.
4. Konotop, D.I., Zinchenko V. P. Optimal'noe proektirovanie slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov s ispol'zovaniem ontologicheskogo podkhoda. Ontologiya proektirovaniya, 2011, 44-53
5. Rodionov A.A. (1990). Matematicheskie metody optimal'nogo proektirovaniya sudovykh konstruktсий. L: Sudostroenie.
6. Simson E. A., Nazarenko S. A. (2005). Optimizatsiya v proektirovanii: teorii i prilozheniya. Infiz: ocherki istorii tvorchestva. Khar'kov : EnergoKlub Ukrainy, 329–345.
7. Sysoeva V.V., Chedrik V.V. (2011). Algoritmy optimizatsii topologii silovykh konstruktсий. Uchenye zapiski TsAGI. XLII, № 2, 91–101.
8. Troitskiy A.V. (2006) Proektirovanie konstruktсий maksimal'noy zhestkosti metodami topologicheskoy optimizatsii. Estestvennye i tekhnicheskie nauki, M: Sputnik plus, № 3, 199 - 202.

УДК 629.584

## ОСОБЕННОСТИ ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С УДЕРЖИВАЮЩИМИ СВЯЗЯМИ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА «ADAMS»

**Семен Анатольевич Никонов**

аспирант, ассистент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
тел. (960) 235-75-93; e-mail: 7on\_egor33@mail.ru

**Надежда Владимировна Островская**

кандидат технических наук  
доцент кафедры механики

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет  
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4  
тел. (911) 835-55-52; e-mail: ostrovskaya.nv@yandex.ru

**Александр Александрович Матюков**

инженер-конструктор 3 категории, АО "Северное проектно-конструкторское бюро"  
198096, Санкт-Петербург, ул. Корабельная, 6  
тел. (921) 721-63-32; e-mail: w18109@yandex.ru

### Аннотация

В работе проводится исследование возможностей программного пакета виртуального моделирования ADAMS для численного анализа механических систем с удерживающими связями. В качестве объекта исследования рассмотрен кривошипно-шатунный механизм, а также приведен пример задачи об ударе шарика о поверхность. Кратко освещается вопрос об особенностях динамических расчетов, построения разрешающих уравнений и моделирования контактных задач в ПК ADAMS. Проведен кинематический анализ механизма, а также сопоставительный анализ аналитического и численного решения. Приведены краткие сведения об алгоритме расчета контактных задач в ПК ADAMS. В качестве контактной задачи рассматривалась задача об ударе шара о поверхность, которая имеет аналитическое решение. Представлены результаты численного расчета, которые показали, что лишь один численный метод дал точное решение.

**Ключевые слова:** MSC.Software, ADAMS, динамический расчет систем с удерживающими связями, кривошипно-шатунный механизм, задачи об ударе, твердотельное моделирование

## FEATURES OF VIRTUAL SIMULATION OF DYNAMIC PROCESSES IN MECHANICAL SYSTEMS WITH BILATERAL CONSTRAINTS USING THE ADAMS PACKAGE

**Semyon A. Nikonov**

Postgraduate Student, Assistant of the Department of Theoretical Mechanics and Resistance of Materials of St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
tel. : +7 (960) 235-75-93, e-mail: 7on\_egor33@mail.ru

**Nadezhda V. Ostrovskaya**

PhD in Engineering Science

Associate Professor, Department of Mechanics, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering  
190005, St. Petersburg, 2 nd Krasnoarmeiskaya st., 4  
tel. : +7 (911) 835-55-52, e-mail: ostrovskaya.nv@yandex.ru

**Alexander A. Matyukov**

Design Engineer, category 3, JSC "Severnoye Design Bureau"  
198096, St. Petersburg, Korabelnaya, 6  
tel. : +7 (921) 721-63-32, e-mail: w18109@yandex.ru

### Abstract

The paper studies the capabilities of the virtual simulation software package ADAMS for the numerical analysis of mechanical systems with bilateral constraints. As an object of study, a crank mechanism has been taken, and an example of the problem of hitting a ball against a surface is also given. The issue on the features of dynamic calculations, formulation of resolving equations, and simulation of contact problems in ADAMS are briefly covered. A kinematic analysis of the mechanism, as well as a comparative analysis of the analytical and numerical solutions has been carried out. Brief information on the algorithm for calculating contact tasks in ADAMS is given. As a contact problem, the problem of hitting a ball on a surface that has an analytical solution is considered. The results of numerical calculation are presented, which showed that only one numerical method gave an accurate solution.

**Keywords:** MSC.Software, ADAMS, dynamic calculation of systems with bilateral constraints, crank mechanism, impact tasks, solid modeling

**Введение**

Целью данной работы является продолжение исследования возможностей программного пакета виртуального моделирования MSC.ADAMS™ (ПК ADAMS). Ранее в качестве такого исследования был предложен сравнительный анализ аналитического и численного расчета механизма выдвигания обтекателя гидроакустической станции морского исполнения [1].

Представляет интерес кратко остановиться на особенностях динамического анализа в ПК ADAMS, а также алгоритме расчета контактных задач. Для иллюстрации возможностей динамического расчета проведен аналитический расчет кривошипно-шатунного механизма с последующим сравнением результатов, полученных в ПК ADAMS. В качестве примера моделирования контактной задачи был рассмотрен удар шарика о поверхность, исходные данные для которого и результаты аналитического расчета взяты из [2].

**1. Особенности динамического анализа в ПК ADAMS**

Вначале остановимся на вопросе о том, каким образом в ПК ADAMS происходит построение разрешающих уравнений.

Программа изначально предполагает использование не традиционных уравнений Лагранжа второго рода, а использование уравнений Лагранжа первого рода с множителями [3, 4].

Положение твердых тел определено тремя

Декартовыми координатами  $x, y$  и  $z$ : 
$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

Ориентация твердых тел определено тремя

углами Эйлера  $\psi, \vartheta$  и  $\phi$ : 
$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \psi \\ \vartheta \\ \phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

Обобщенные координаты  $i$ -го тела

записываются в виде: 
$$q_i = \begin{bmatrix} p_i \\ \varepsilon_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

Для описания движения твердых тел в ПК ADAMS используются следующие уравнения:

$M$  – универсальная матрица масс;

$\bar{J}$  – универсальная матрица инерции;

$K$  – кинетическая энергия, определяемая выражением:

$$K = \frac{1}{2} u^T M u + \frac{1}{2} \bar{\omega}^T \bar{J} \bar{\omega} \quad (4)$$

где  $u = \dot{p}$ ,  $\bar{\omega} = B \dot{\varepsilon} = B \dot{\zeta}$ ,

$$B = \begin{bmatrix} \sin\phi \sin\vartheta & 0 & \cos\phi \\ \cos\phi \sin\vartheta & 0 & -\sin\phi \\ \cos\vartheta & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{линейные и угловые}$$

скорости выражены через обобщенные координаты.

$$F(q, \dot{q}, t) = \begin{bmatrix} f \\ \bar{n} \end{bmatrix} \in R^6 \text{ – вектор приложенных сил;}$$

$Q(q, \dot{q}, t) \in R^6$  – обобщенная сила, действующая на тела и полученная проецированием прикладываемого усилия  $F$  в обобщенных координатах.

Обычно 
$$Q = \begin{bmatrix} (\Pi^P)^T f \\ (\Pi^P)^T \bar{n} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $v^P$  скорость в точке приложения  $P$  внешнего усилия  $F$ , операторы проецирования вычислены следующим образом:

$$\Pi^P = \frac{\partial v^P}{\partial u}, \quad \Pi^R = \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial \zeta}. \quad (6)$$

Формулировка уравнений движения в ADAMS:

$$\frac{d}{dt} \left[ \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{q}} \right)^T \right] - \left( \frac{\partial K}{\partial q} \right)^T + \Phi_q^T \lambda = Q. \quad (7)$$

Рассматривая выбор обобщенных координат как в (3), перепишем (8) для жесткого тела как:

$$\frac{d}{dt} \left[ \left( \frac{\partial K}{\partial u} \right)^T \right] - \left[ \left( \frac{\partial K}{\partial p} \right)^T \right] + \begin{bmatrix} \Phi_p^T \lambda \\ \Phi_\varepsilon^T \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\Pi^P)^T f \\ (\Pi^P)^T \bar{n} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

т. к. 
$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial u} \right)^T = M \dot{u}, \quad \left( \frac{\partial K}{\partial p} \right)^T = 0 \quad (9)$$

с угловыми моментами определенными как

$$\Gamma \equiv \frac{\partial K}{\partial \zeta} = B^T \bar{J} B \zeta. \quad (10)$$

Уравнения движения (7) перепишутся в:

$$M \dot{u} + \Phi_p^T \lambda = (\Pi^P)^T f$$

$$\dot{\Gamma} - \frac{\partial K}{\partial \varepsilon} + \Phi_\varepsilon^T \lambda = (\Pi^P)^T \bar{n}. \quad (11)$$

В итоге ПК АДАМС генерирует 15 уравнений, которые обеспечивают всю необходимую информацию для численного динамического анализа механической системы:

$$M \dot{u} + \Phi_p^T \lambda - (\Pi^P)^T f = 0, \quad (12)$$

$$\Gamma - B^T \bar{J} B \zeta = 0, \quad (13)$$

$$\dot{\Gamma} - \frac{\partial K}{\partial \varepsilon} + \Phi_\varepsilon^T \lambda - (\Pi^P)^T \bar{n} = 0, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{p} - u &= 0 \\ \dot{\varepsilon} - \zeta &= 0 \end{aligned}, \quad (15)$$

решение которой должно также удовлетворить кинематическим граничным условиям.

В начальный момент времени ADAMS решает алгебраические уравнения (уравнения связей), результаты решения которых являются начальными условиями для дифференциальных уравнений движения.

**2. Моделирование кривошипно-шатунного механизма и его численный анализ в ПК ADAMS**

В качестве объекта исследования был выбран кривошипно-шатунный механизм (КШМ).

В силу сложности и громоздкости выражений для потенциальной и кинетической энергии модели КШМ была рассмотрена упрощенная схема (рис. 1). Аналитические выражения определялись для одной обобщенной координаты  $q_1 = \varphi$  ( $OA = AB = l$ ).

Уравнения связей:

$$f'(\varphi, \vartheta) = [(\pi - \varphi) - \vartheta] = 0; \quad (16)$$

$$f''(\varphi, \vartheta) = l \sin \varphi - l \sin \vartheta = 0 \Rightarrow$$

$$\sin \varphi = \sin \vartheta, \cos \varphi = -\cos \vartheta;$$

$$\dot{f}'(\varphi, \vartheta) = -\dot{\varphi} - \dot{\vartheta} = 0 \Rightarrow \dot{\vartheta} = -\dot{\varphi} \Rightarrow \ddot{\vartheta} = -\ddot{\varphi}.$$

Кинематические соотношения:

$$x_{c1} = \frac{l}{2} \cos \varphi, \dot{x}_{c1} = -\frac{l}{2} \dot{\varphi} \sin \varphi; x_{c2} = \frac{3l}{2} \cos \varphi,$$

$$\dot{x}_{c2} = -\frac{3}{2} l \dot{\varphi} \sin \varphi; y_{c2} = \frac{l}{2} \sin \varphi, \dot{y}_{c2} = \frac{l}{2} \dot{\varphi} \cos \varphi;$$

$$x_b = 2l \cos \varphi, \dot{x}_b = v_b = -2l \dot{\varphi} \sin \varphi; \quad (17)$$

$$v_{c2}^2 = l^2 \left( \frac{1}{4} + 2 \sin^2 \varphi \right) \dot{\varphi}^2 = \frac{1}{4} l^2 (1 + 8 \sin^2 \varphi) \dot{\varphi}^2.$$

Кинетическая энергия системы:

$$T = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} &\frac{ml^2}{3} \dot{\varphi}^2 + ml^2 \frac{1}{4} (1 + 8 \sin^2 \varphi) \dot{\varphi}^2 \\ &+ \frac{ml^2}{12} \dot{\varphi}^2 + 4ml^2 \dot{\varphi}^2 \sin^2 \varphi \end{aligned} \right\} = \quad (18)$$

$$= \frac{1}{2} ml^2 \left( \frac{2}{3} + 6 \sin^2 \varphi \right) \dot{\varphi}^2$$

Потенциальная энергия системы:

$$\Pi = -mgx_{c1} - mgx_{c2} - mgx_b =$$

$$= -mg \left( \frac{l}{2} \cos \varphi + \frac{3l}{2} \cos \varphi + 2l \cos \varphi \right) = \quad (19)$$

$$= -4mgl \cos \varphi$$

Запишем динамическое уравнение движения. Для этого воспользуемся уравнением Лагранжа II рода [5]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = -\frac{\partial \Pi}{\partial \varphi}. \quad (20)$$

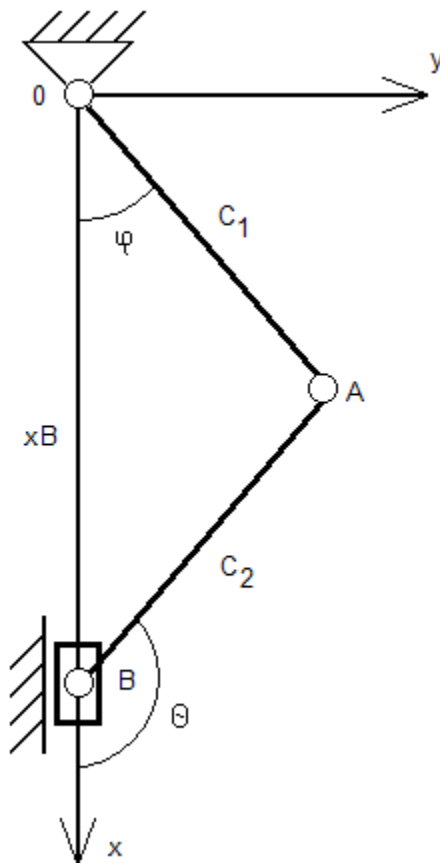


Рис. 1. Общий вид кривошипно-шатунного механизма

Линеаризация выражений для кинетической (18) и потенциальной энергии (19):

$$T = \frac{1}{2} A_{11}(\varphi) \dot{\varphi}^2, \quad A_{11}(\varphi) = ml^2 \left( \frac{2}{3} + 6 \sin^2 \varphi \right),$$

$$A_{11}(\varphi) = \underbrace{A_{11}(0)}_{a_{11}} + \frac{\partial A_{11}}{\partial \varphi} \varphi + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 A_{11}}{\partial \varphi^2} \varphi^2 + \dots, \quad (21)$$

$$a_{11} = A_{11}(0) = \frac{2}{3} ml^2.$$

$$\Pi = \Pi(0) + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} \varphi + \frac{1}{2} \underbrace{\frac{\partial^2 \Pi}{\partial \varphi^2}}_{c_{11}} \varphi^2 + \dots, \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \Pi &= -4mgl \cos \varphi \cong -4mgl \left( 1 - \frac{\varphi^2}{2} \right) = \\ &= \frac{1}{2} \underbrace{(4mgl)}_{c_{11}} \varphi^2 - 4mgl \end{aligned}, \quad c_{11} = 4mgl.$$

После преобразований, подставив (21) и (22) в (20), получим:

$$ml^2 \left( \frac{2}{3} + 6 \sin^2 \varphi \right) \ddot{\varphi} + 3ml^2 \dot{\varphi}^2 \sin 2\varphi = -4mgl \sin \varphi \quad (23)$$

Период колебаний при малых углах отклонения:

$$l = 0.4 \text{ м}, \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{1}{k_0^2}} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{6g}} = 0.52 \text{ с}, \quad (24)$$



где  $k_0^2 = \frac{c_{11}}{a_{11}} = \frac{12mgl}{2ml^2} = \frac{6g}{l}$ .

Численный расчет в ПК ADAMS для вышеописанной модели КШМ (рис. 2) представлен в виде графика периода колебаний механизма (рис. 3), который равен 0.52 с.

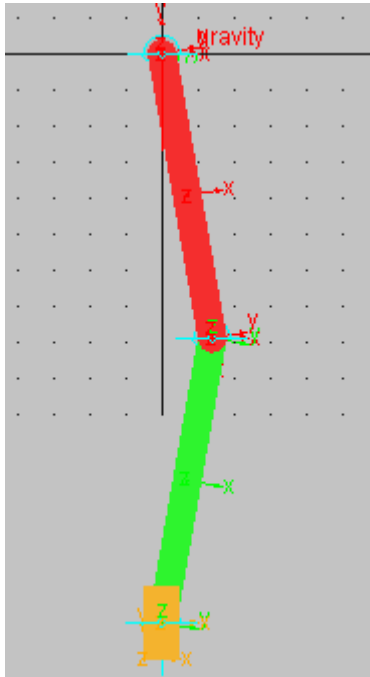


Рис. 2. Расчетная схема КШМ в ПК ADAMS

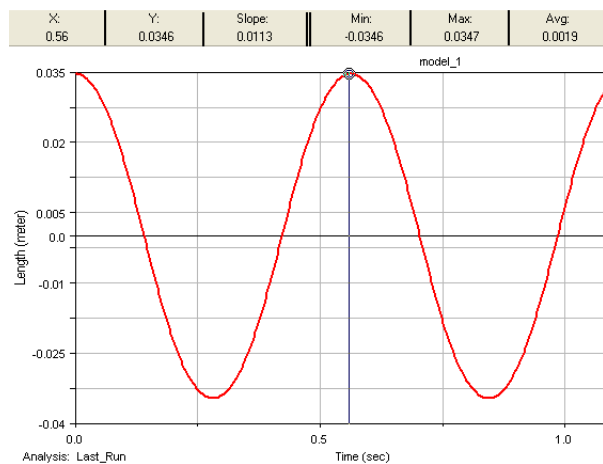


Рис. 3. Период колебаний механизма, полученный после численного решения в ПК ADAMS

Как видно, результаты аналитического расчета совпадают с результатами, полученными в ПК ADAMS. Однако, следует отметить, что результаты решения пакета ПК ADAMS являются более точными, т.к. при аналитическом расчете при вычислениях была произведена линеаризация дифференциального уравнения движения маятника.

### 3. Задача об ударе шарика о поверхность

В ПК ADAMS представлена возможность моделирования процесса контактирования двух и более тел [4, 6]. Контактные силы представляют взаимодействие свободно движущихся тел при столкновениях и сгруппированы в две категории:

- двумерные контакты, которые включают взаимодействия между плоскими геометрическими элементами (например, окружность, кривая и точка);
- трехмерные контакты содержат взаимодействия между твердыми телами (например, цилиндры, замкнутые оболочки, профили и тела вращения).

Контактные силы используют два алгоритма для вычисления нормальной реакции:

*Контакт на основе коэффициента восстановления (Restitution-based contact)* – в этом методе вычисляется контактная сила исходя из параметра штрафа и коэффициента восстановления.

*Контакт основанный на ударной функции (IMPACT-Function-Based Contact)* – в этом методе вычисляется контактная сила, используя функцию IMPACT. Силы по существу моделируются нелинейной пружиной-демпфером.

Последний алгоритм определения контактной силы вычисляет ее по формуле:

$$IMPACT = \begin{cases} \text{Max}(0, k(x_1 - x)^e - \\ - \text{STEP}(x, x_1 - d, c_{\text{max}}, x_1, 0)\dot{x}) : & x < x_1 \\ 0 & x \geq x_1 \end{cases}$$

где:  $x$  - переменная расстояния;  $\dot{x}$  - переменная скорости; триггер переменной расстояния  $x_1$ ; коэффициент жесткости  $k$ ; показатель степени  $e$ ; коэффициент демпфирования  $c_{\text{max}}$ ; глубина проникновения  $d$ .

Функция IMPACT активизируется, когда расстояние между I и J маркерами становится меньше расстояния  $x_1$ , то есть, когда две геометрии проникают друг в друга. Если расстояние между I и J маркерами больше, чем расстояния  $x_1$ , то функция Impact равна 0. Пример системы, которую можно моделировать с использованием данной функции: шар, падающий на землю (рис. 4).

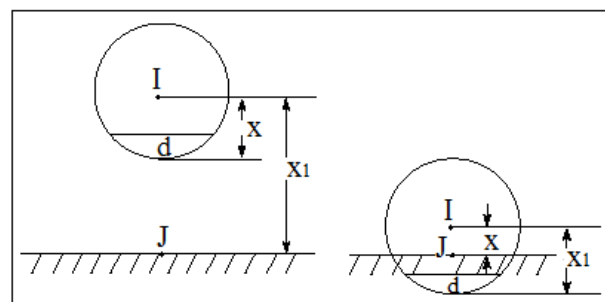


Рис. 4. Расчетная схема задачи об ударе шара

Чтобы проанализировать точность решения каждого из численных методов с каждым из способов задания контактов была выполнена серия виртуальных экспериментов одного и того же физического процесса, а именно: падение сферы определенной массы  $m$  с фиксированной высоты  $h$  на горизонтальную неподвижную плиту.

Для начала попробуем экспериментально определить, какой из решателей в модуле ADAMS/Solver™ дает самое точное решение нашей задачи.

На рис. 5 изображена схема виртуального эксперимента, который моделировал контактную задачу в ПК ADAMS.

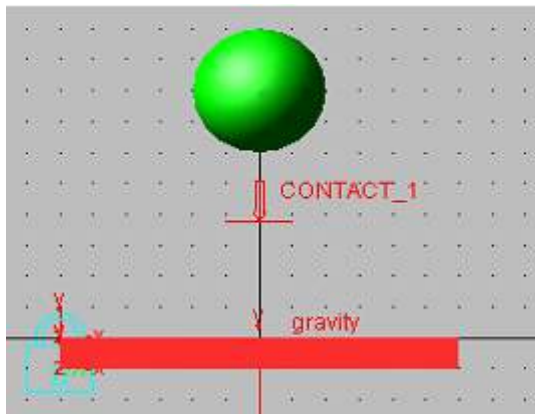


Рис. 5. Моделирование контактной задачи в ПК ADAMS

Исходные данные, а также результаты аналитического расчета были взяты из работы [2]:

- Материал сферы – алюминий;
- Материал плиты – сталь;
- Коэффициент восстановления при ударе

$$k = 0.85;$$

Высота падения  $h_1 = 300 \text{ мм}$ ;

Скорость сферы перед ударом:

$$V_{\text{До\_удара}} = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 0.3} = 2.426 \text{ м/с};$$

Скорость сферы после удара:

$$V_{\text{После\_удара}} = kV_{\text{До\_удара}} = 0.85 \cdot 2.426 = 2.062 \text{ м/с};$$

Высота отскока:

$$h_2 = k^2 h_1 = 0.85^2 \cdot 300 = 216.75 \text{ мм}.$$

Результаты численного расчета контактной задачи в ПК ADAMS показали, что из пяти предложенных разработчиками пакета решателей, только с помощью трех удалось получить результаты. На рис. 7 и 8 представлены результаты численного расчета для различных коэффициентов восстановления при ударе. В свою очередь лишь один численный метод дал точное решение (рис. 7).

### Заключение

В качестве сравнительного анализа аналитического и численного расчета был осуществлен кинематический анализ кривошипно-шатунного механизма.

Результаты аналитического расчета фактически совпадают с результатами, полученными в ПК ADAMS. Следует отметить, что результаты решения ПК ADAMS являются более точными, т.к. при аналитическом расчете при вычислениях была произведена линеаризация дифференциального уравнения движения маятника.

Численный анализ контактной задачи в ПК ADAMS показал, что лишь один численный метод дает точное решение (рис. 7).

Результаты двух расчетов имеют качественное и количественное совпадение, что позволяет говорить о том, что выполненный численный анализ является одной из верификаций ПК ADAMS.

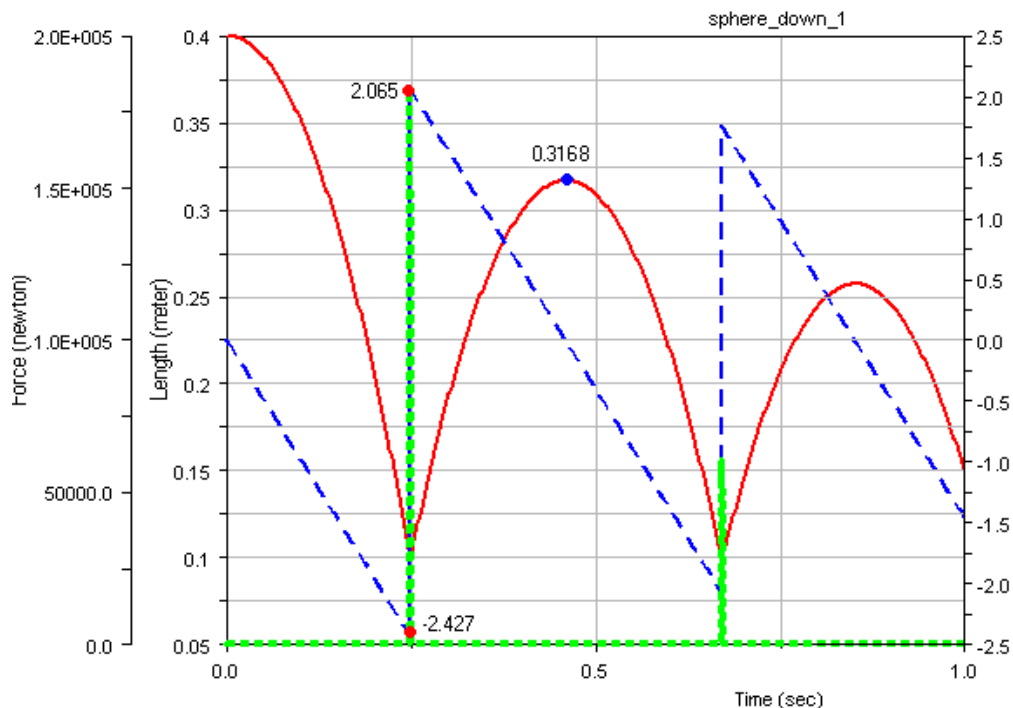


Рис. 6. График изменения высоты отскока сферы, скорости и силы при  $k = 0.85$

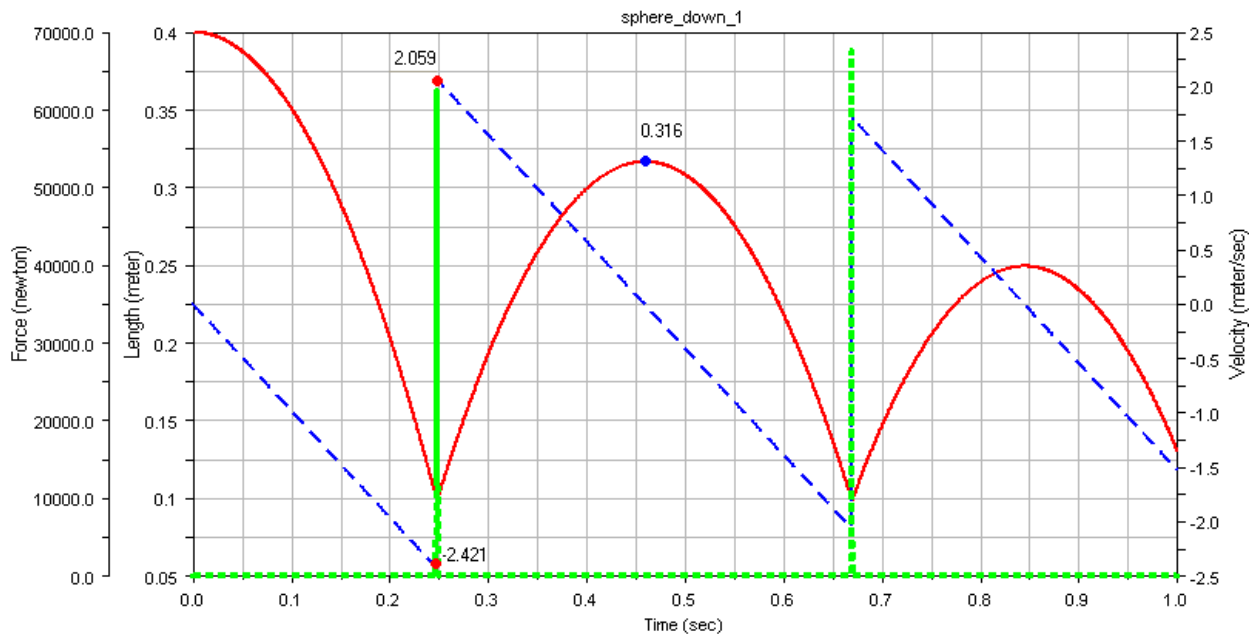


Рис. 7. График изменения высоты отскока сферы, скорости и силы при  $k = 1$

Авторы статьи благодарят Плотникова Александра Михайловича за руководство и вклад в развитие специальности «Прикладная механика», а также кафедру ТМ и СМ СПбГМТУ в лице заведующего кафедрой Черныша Александра Алексеевича за предоставленную возможность использования лицензионной версии ПК ADAMS

**Литература**

1. Никонов С.А., Матюков А.А., Островская Н.В. Особенности виртуального моделирования динамических процессов на примере расчета привода с помощью ПК «ADAMS» // Морские интеллектуальные технологии, № 2(40) Т. 1, 2018, С. 160–165.
2. Гольдсмит В. Теория Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел. – М.: Издательство литературы по строительству, 1965. 448 с.
3. Поляков К.А. Использование первичных элементов пакета ADAMS для создания виртуальных моделей. Самара: СамГУ, 2000. 91 с.
4. «Виртуальная разработка изделий – технологии XXI века» - методическая литература представительства MSC.Software.
5. Колесников К.С. Курс теоретической механики. Учебник для вузов / В. И. Дронг, В. В. Дубинин, М. М. Ильин и др.; Под общ. ред. К. С. Колесникова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 736 с.
6. Шипов Д.Н. Начальные шаги работы с ADAMS/View (обучающее руководство, в режиме шаг за шагом). Нижний Новгород: CAD-FEM, 2001. 58 с.

**References**

1. Nikonov S.A., Matyukov A.A., Ostrovskaya N.V. Osobennosti virtual'nogo modelirovaniya dinamicheskikh processov na primere rascheta privoda s pomoshh'yu PK «ADAMS». Morskie intellektual'ny'e tekhnologii. № 2(40) Т. 1. 2018. PP. 160–165.
2. Gol'dsmit V. Teoriya Udar. Teoriya i fizicheskie svoystva soudaryaemy`x tel. M.: Izdatel'stvo literatury` po stroitel'stvu. 1965. 448 p.
3. Polyakov K.A. Ispol'zovanie pervichnykh ehlementov paketa ADAMS dlya sozdaniya virtual'nykh mode-lej. Samara: SamGU, 2000. 91 p.
4. «Virtual'naya razrabotka izdelij – tekhnologii XXI veka» - metodicheskaya literatura predstavi-tel'stva MSC.Software.
5. Kolesnikov K.S. Kurs teoreticheskoy mekhaniki. Uchebnik dlya vuzov/ V. I. Drong, V. V. Dubinin, M. M. Il'in i dr.; Pod obshch. red. K. S. Kolesnikova. M.: Izd-vo MGTU im. N. EH. Baumana, 2005. 736 p.
6. SHipov D.N. Nachal'nye shagi raboty s ADAMS/View (obuchayushchee rukovodstvo, v rezhime shag za sha-gom). Nizhnij Novgorod: CAD-FEM, 2001. 58 p.

УДК 528.854

## РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ МОДЕЛИРОВАННОГО ЛЬДА ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА РАЗРАСТАНИЯ

### **Петр Николаевич Звягин**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Высшей математики, заведующий лабораторией, «Вычислительные модели для Арктики» Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29; старший научный сотрудник Крыловского государственного научного центра, 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел. +7(812)552-67-50, e-mail: pnzvyagin@gmail.com

### **Максим Андреевич Степанов**

студент кафедры Вычислительной техники и информационных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3. Инженер лаборатории «Вычислительные модели для Арктики», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29. Тел. +7(812)570-44-12, e-mail: stepanovm960@gmail.com

### **Татьяна Леонидовна Звягина**

студентка кафедры «Теоретическая механика», инженер научно-образовательного центра «Газпромнефть-Политех», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29. Тел. +7(812)290-98-72, e-mail: tlzvyagina@gmail.com

### **Аннотация**

В связи с активным развитием навигации в акваториях Арктического региона и работами над созданием систем электронной навигации задачи распознавания, структурирования и сегментации изображений ледовых полей и плавающих льдин приобрели актуальность. В работе изучается распознавание изображений моделированного льда, полученных в ледовом бассейне Крыловского государственного научного центра (Санкт-Петербург), при помощи метода разрастания области. Рассмотрены две модификации этого метода для работы на изображении в градациях серого, и одна модификация для работы на бинаризованном изображении. В статье показано, что зернистая структура моделированного льда и частичная притопленность краев льдин способны вносить существенный шум в изображения, усложняя распознавание границ. Дана классификация шума, встречающегося при распознавании краев льдин. В работе изучено влияние трех способов низкоуровневой блоковой фильтрации на подготовку изображений краев моделированных льдин к бинаризации по методу Оцу в целях дальнейшей сегментации. На примере рассмотренных изображений продемонстрирована тенденция снижения шума при увеличении размера блока фильтрации.

**Ключевые слова:** лед, изображение, распознавание, фильтрация, метод разрастания

## RECOGNITION OF SIMULATED ICE IMAGES USING THE REGION-GROWING METHOD

### **Petr N. Zvyagin**

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics Head of Laboratory, "Computational Models for the Arctic" St. Petersburg Polytechnic University named after Peter the Great, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29; Senior Researcher at the Krylov State Research Center, 196158, St. Petersburg, Moskovskoye shosse, 44 tel. : +7812552-67-50, e-mail: pnzvyagin@gmail.com

### **Maxim A. Stepanov**

Student of Computer Engineering and Information Technology, St. Petersburg State Marine Technical University, 190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3 Engineer of Laboratory, "Computational Models for the Arctic" St. Petersburg Polytechnic University named after Peter the Great, 195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29; tel. : +7812570-44-12, e-mail: stepanovm960@gmail.com

### **Tatyana L. Zvyagina**

Student of the department "Theoretical Mechanics"

Engineer of the "Gazpromneft-Polytech" Research and Education Center,  
St. Petersburg Polytechnic University named after Peter the Great,  
195251, St. Petersburg, Polytechnicheskaya, 29;  
tel. : +7812290-98-72, e-mail: tlzvyagina@gmail.com

#### Abstract

Due to active development of navigation in the waters of the Arctic region and the work on the creation of electronic navigation systems, the tasks of recognizing, structuring and segmentation of images of ice fields and floating ice have become highly topical. This paper studies the recognition of simulated ice images obtained in the ice experimental tank of the Krylov State Research Center (St. Petersburg) using the region-growing method. Two modifications of this method for working on the image are considered: in grayscale and binarized one. The article shows that the granular structure of simulated ice and partial submergence of ice floes edges are capable of introducing significant noise into images, complicating the recognition of boundaries. A classification of noise occurring when recognizing the edges of ice floes is given. The paper studies the influence of three methods of low-level block-matching filtering on preparation of simulated floes edges images for binarization, based on the Otsu method for further segmentation. On the example of the reviewed images, the tendency of noise reduction with increasing filtration block size is demonstrated.

**Keywords:** ice, image, recognition, filtration, region-growing method

#### Введение

Для современных систем электронной навигации актуальной задачей является распознавание объектов на изображениях, полученных различными способами.

Основной задачей при обработке таких изображений является распознавание границ льдин и ледовых полей для определения их местоположения и для их отделения от других объектов, присутствующих на изображении [1].

Спутниковая съемка льдин и ледовых полей длительное время используется для составления ледовых карт. Имеется ряд работ отечественных и зарубежных авторов, посвященных этому вопросу, например [2], [3] и др.

Тем не менее, сравнительную апробацию различных методов обработки изображений льдин удобнее всего производить на изображениях льдин, моделированных в ледовых опытовых бассейнах. Это связано с возможностью оперативно получить фотографии льдин с теми особенностями, которые могут потребовать для своего распознавания специальной обработки. Поэтому в данной работе использовались изображения моделированных льдин, полученных по технологии Fine Grain (FG) в ледовом бассейне Крыловского государственного научного центра (Санкт-Петербург). Предложена методика обработки этих изображений, которая может использоваться для создания компьютерных карт расположения объектов на поверхности ледового бассейна, а также служить основой для систем распознавания натуральных льдин и разводий в Арктическом регионе.

Обращаясь к анализу существующих алгоритмов распознавания объектов на изображениях, следует отметить их большое разнообразие и применение разных математических аппаратов для их создания. Так, например, ряд методов базируется на анализе структурных особенностей изображений: методы поиска границ, выделения определенных структур, методы активного контура и другие. Существуют

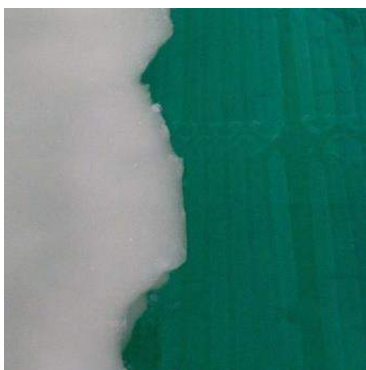
также алгоритмы, базирующиеся на применении статистических методов к анализу изображений, например, различные классификаторы, методы кластерного анализа. Есть также своеобразные гибридные методики, сочетающие в себе структурный и стохастический подходы, например, некоторые методы наращивания областей по определенному критерию от выбранной точки. К таким методам относится метод разрастания, примененный в настоящей статье для распознавания ледовых объектов.

В настоящий момент авторам не известно комплексных исследований, целиком ориентированных на обработку изображений плавающих льдин, которые бы адекватно отражали природные особенности этих объектов и возможные условия их фотосъемки. В настоящей работе проанализировано влияние различных методов фильтрации на уровень шума при распознавании границ моделированных льдин в целях их последующей сегментации.

#### 1. Исследуемые ледовые объекты

В настоящей работе для исследования использованы фотографии, выполненные авторами в ледовом бассейне Крыловского государственного научного центра при помощи фотоаппарата, входящего в штатное оборудование ледового бассейна.

Типичные состояния границ ледовых объектов представлены на рис.1,2. На рис. 1а и 1б приведены левая и правая границы разводья с одной и той же фотографии, выполненной без применения фотовспышки. На этой фотографии яркость была усилена при помощи предварительной обработки в среде Photoshop. На рис. 2а и 2б приведены края ледовых полей, полученных при фотографировании со вспышкой, эти изображения не подвергались дополнительной обработке. На рис. 3 приведена отдельно плавающая небольшая льдина, а на рис. 4 – трещина в моделированном ледовом поле.



a)

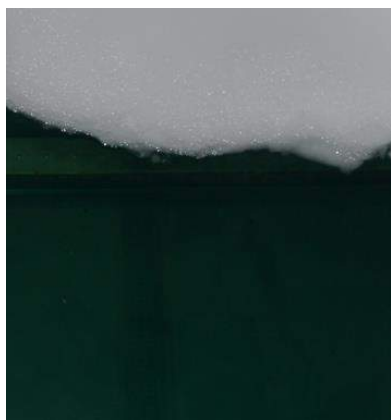


b)

Рис 1а), 1b). Границы развода, сфотографированные без фотовспышки, яркость увеличена впоследствии.



a)



b)

Рис 2. а), 2b). Границы льдины, сфотографированные с фотовспышкой, дополнительная постобработка не производилась.



Рис. 3. Отдельно плавающая льдина



Рис. 4. Трещина в моделированном ледовом поле

На границах льдин на этих рисунках видны типичные особенности таких фотографий: блики, вызванные штатным освещением или фотовспышкой, нерезкие границы, наличие мокрого края, налипшая на край крошка, затененность фрагментов края выступами льдины. На рис. 4 края трещины вследствие рыхлости материала расходятся неравномерно, и соприкасаются в некоторых местах.

## 2. Примененные методы и алгоритмы

Метод разрастания [4], [5] относится к классу методов сегментации изображения, т.е. выделения отдельных частей изображения. Как правило, методы из этого класса применяются не к исходному изображению, а к результату его предобработки. От вида и параметров предобработки существенно зависят результаты применения методов сегментации.

Алгоритм разрастания области по интенсивности пикселей, примененный в настоящей работе, имеет три входных параметра: координаты начальной точки и величину  $\lambda$  допустимого отклонения интенсивности вновь принимаемых в область пикселей от средней величины интенсивности пикселей, уже принадлежащих области.

Имея цель сегментировать при помощи этого алгоритма светлую льдину на более темной воде и, считая, что на изображении отсутствуют блики от фотовспышки, за начальную точку можно взять самый светлый пиксель изображения. Таким образом, число параметров алгоритма разрастания на изображении в градациях серого удается сократить до одного  $\lambda$ .



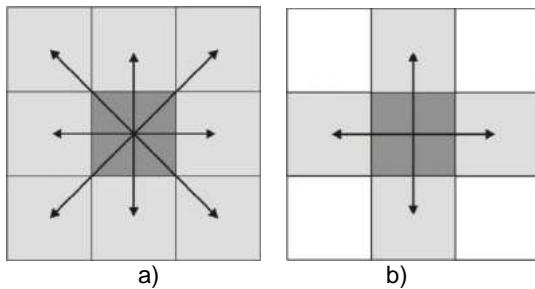


Рис. 5. Схема направлений разрастания из пикселя.

Примененный алгоритм состоит в следующем.

**Алгоритм 1 (разрастание по интенсивности):**

1. Добавить начальную точку в область
2. Найти среднее значение  $\mu$  интенсивности точек в области.
3. Взять граничную точку из области и исследовать окружающие ее точки: если их интенсивность находится в пределах  $(\mu(1 - \lambda), \mu(1 + \lambda))$ , то добавить их в область.
4. Перейти к пункту 2.

Разрастание в Алгоритме 1 может быть выполнено по всем восьми направлениям, включая диагональные (схема рис. 5. а), или только по горизонтальному и вертикальному направлениям (схема на рис. 5 б). На рис. 5 темным цветом показан пиксель, из которого происходит разрастание, стрелками – направления разрастания, а серым цветом – просматриваемые при итерации разрастания пиксели. От выбора схемы направлений при разрастании зависит появление дополнительного шума. Этот вопрос будет рассмотрен в разделе ниже.

Для работы Алгоритма 1 на изображении без предобработки часто требуется продолжительное время: пункт 2 требует значительного числа операций, а число итераций в Алгоритме 1 оказывается порядка квадрата диаметра сегментируемой области в пикселях, что особенно велико при высоком разрешении изображения. В то же время, за счет предобработки и фильтрации изображения время работы алгоритма разрастания по интенсивности может быть существенным образом сокращено.

К исходным изображениям, представленным в предыдущем разделе, в настоящей работе применены следующие этапы предварительной обработки:

1. преобразования цветного изображения в изображение, состоящее из градаций серого цвета с диапазоном его интенсивности от 0 до 255;
2. фильтрация изображения низкоуровневыми методами, позволяющая избавиться от шума;
3. преобразование монохромного изображения в бинаризованное.

Алгоритм 1 может быть применен после каждого из перечисленных этапов предварительной обработки, но скорость его работы существенно увеличивается после шагов 2 и 3.

Формула перехода из цветовой модели RGB в оттенки серого, применявшаяся на первом этапе обработки, имеет вид:

$$I(x, y) = \alpha * R(x, y) + \beta * G(x, y) + \gamma * B(x, y), \quad (1)$$

где  $I$  – получающийся оттенок интенсивности серого,  $R, G, B$  – исходные значения красного, зеленого и синего каналов цвета пикселя с координатой  $(x, y)$ ;  $\alpha, \beta, \gamma$  – числовые коэффициенты, общая сумма которых равна единице.

В настоящей работе при переводе изображений в градации серого были использованы значения коэффициентов  $\alpha, \beta$  и  $\gamma$  равные  $1/3$ , что подразумевает равноправный учет влияния каждого из трех базовых цветов палитры.

В практике обработки изображений используют глобальную и локальную фильтрации. Глобальная фильтрация, применяющая один фильтр ко всему изображению, используется редко. Для выявления отдельных характерных особенностей удобнее использовать локальную фильтрацию, при которой усреднение проводится не по всему изображению, а по небольшим его участкам – квадратным блокам.

В настоящей работе использованы три способа локальной блоковой фильтрации – по среднему внутри окна, по медиане внутри окна и по среднему гармоническому внутри окна [6] [7]. Во всех трех способах фильтрации квадратное окно со стороной  $n$  пикселей последовательно передвигалось с шагом, равным стороне окна, по изображению в градациях серого. Внутри окна в его текущем положении значения интенсивностей всех пикселей заменялись на значение, полученное по формуле конкретного фильтра. При некратности размеров изображения целому числу сторон блока остатки рассматривались как состоящие из частичных прямоугольных блоков со сторонами, не большими  $n$ .

В фильтрации по среднему внутри окна использовалась формула:

$$I_f(x, y) = \text{mean}(\{I_S\}), \quad (2)$$

где  $I_f(x, y)$  - интенсивность пикселя с координатами  $(x, y)$  после применения фильтрации,  $S$  - множество точек внутри передвигаемого окна.

В фильтрации по медиане применялась формула:

$$I_f(x, y) = \text{med}(\{I_S\}), \quad (3)$$

то есть находилось значение выборочной медианы. В фильтрации по среднему гармоническому применялась формула:

$$I_f(x, y) = \frac{n^2}{\sum_{(x,y) \in S} \frac{1}{I(x,y)}}. \quad (4)$$

Единственным параметром у этих трех фильтров являлось значение ширины окна  $n$ .

Обычно при обработке изображений в качестве одного из промежуточных этапов используют пороговую бинаризацию [9]: пикселям, значения интенсивности которых оказываются меньше заданного порога, приписывается черный цвет (в нашем случае - вода), а остальным – белый цвет (в нашем случае - лед).

Для бинаризации в работе применялся метод Оцу [8]. Этот метод использует гистограмму изображения, переведенного в градации серого, и не имеет параметров. Метод Оцу предполагает разделение всего диапазона, занимаемого гистограммой, на два класса. Он находит такое пороговое значение  $t$  между этими классами, которое уменьшает взвешенную сумму их дисперсий:

$$\sigma_W^2(t) = p_1(t)\sigma_1^2(t) + p_2(t)\sigma_2^2(t), \quad (5)$$



где  $t$  – пороговое значение, разделяющее два класса,  $p_1$  и  $p_2$  – веса классов 1 и 2, а  $\sigma_1^2$  и  $\sigma_2^2$  – дисперсии классов 1 и 2. При помощи итеративной процедуры производится переход от некоторого начального значения порога  $t_0$  к значению  $t^*$ , доставляющему минимум функции (5) при заданной гистограмме, которое и принимается за искомое пороговое значение.

Найденное пороговое значение  $t^*$  используется для бинаризации исходного изображения в градациях серого.

При сегментации по методу разрастания полученного бинаризованного изображения Алгоритм 1 преобразовывается в более короткий Алгоритм 2:

**Алгоритм 2 (разрастание бинаризованного изображения):**

1. Добавить начальную точку в область
2. Взять граничную точку из области и исследовать окружающие ее точки: если их интенсивность такая же, как и у точек в области, то добавить их в область.
3. Перейти к пункту 2.

Как видно из Алгоритма 2, отпадает необходимость в параметре  $\lambda$ , а кроме того, вычисления в п.2 используют гораздо меньше операций, поэтому такой случай представляет собой особый интерес.

**3. Шум в изображениях**

Для эффективности применения указанных методов требуется достаточно высокое качество исходных изображений. Практически все методы чувствительны к так называемым шумам – искажениям изображений, которые могут возникнуть, например, при определенных условиях съемки, освещении. К шумам для изображений льдин можно также отнести притопленность их краев, зернистую структуру края, наличие мелкой ледяной крошки вблизи края льдины, затененность края льдины соседним плавающим объектом и так далее. В связи с этим любая обработка изображений представляет собой многоуровневый процесс, на каждом шаге которого решается та или иная локальная задача, в итоге приводящий к выделению искомого объекта на изображении.



Рис. 6. а) Льдина с притопленным краем

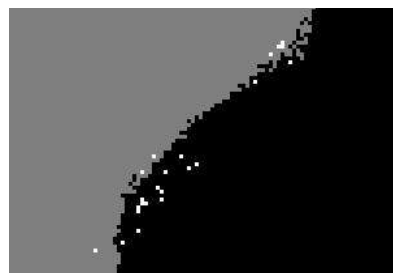


Рис. 6. б) Шум I типа

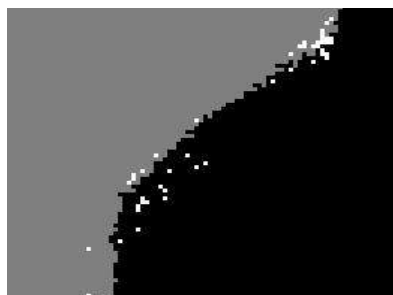


Рис. 6. в) Шум I и II типа

Одним из важнейших шагов таких процессов является удаление шумов, которые могут исказить границы объекта двумя путями: привести к потере части реальной границы объекта или привести к образованию «паразитного» фрагмента объекта, не существующего в реальности.

На рис.6б и 6с представлены результаты, достигнутые после такой стандартной бинаризации без предварительной фильтрации для исходной льдины, показанной на рис.6а., имеющей один из самых проблемных с точки зрения распознавания фрагмент границ – притопленный край.

При наличии притопленности границ льда, стандартная пороговая бинаризация приводит к появлению разрывов в границе раздела лед-вода. «Выбросы» пикселей черного цвета внутрь серого сегмента льда, и серого цвета внутрь сегмента черной воды могут быть изолированными, или соединяться с основным сегментом посредством горизонтальных, вертикальных или диагональных «мостиков».

Полностью изолированные «выбросы» противоположного цвета будем считать шумом, возникшим вследствие световых бликов и обводненности краев льдины. Эти пиксели на рис. 6б и 6с показаны белым цветом. Появление таких «выбросов» на бинаризованных изображениях заставляет включить перед бинаризацией этап фильтрации шума.

Рассмотрим два случая расположения шума на границе сегментов лед-вода в бинаризованном изображении. Шумом первого типа назовём отдельные пиксели и группы пикселей, полностью «погруженные» в сегмент противоположного цвета, и не соединенные с основным сегментом своего цвета. Такой шум дают световые блики, тёмные «зёрна» на ледовом поле и проступающие сквозь воду притопленные части льдин и ледовой крошки. Шум первого типа представлен в виде белых точек на рис 6 б.

Шумом второго типа назовём «выбросы» с диагональными «мостиками». Таким образом, будем

считать полноценным соединением с основным сегментом лишь горизонтальное и вертикальное соединение. Как правило, шум второго типа образуется в местах перехода надводной границы раздела «лед-вода» в ее подводную часть. Шумы первого и второго типов одновременно представлены белым на рис. 6 с.

**4. Сегментация бинаризованного изображения**

Для сегментации бинаризованного изображения отдельной льдины или границы ледового поля, при отсутствии зашумленности изображения, достаточно произвольным образом поставить начальную точку, после чего использовать Алгоритм 2. В результате изображение будет разделено на два сегмента: лёд и вода. На практике, после пороговой бинаризации изображений льдин или ледовых полей, появляется шум как первого, так и второго типов. Вследствие этого число найденных по бинаризованному изображению различных сегментов может быть достаточно велико, поскольку шумы будут давать отдельные сегменты.

Для отделения шума первого типа от основного сегмента можно использовать разрастание по схеме, представленной на рис. 5 а, а для отделения шумов первого и второго типов одновременно – разрастание по схеме на рис. 5 б.

Обозначим  $k_w$  – число найденных сегментов белого цвета,  $k_b$  – число найденных сегментов черного цвета,  $s_i$  – мощность (число пикселей)  $i$ -го сегмента,  $w$  – индекс, соответствующий белому цвету сегмента,  $b$  – индекс, соответствующий черному цвету. Упорядочим найденные на изображении сегменты по убыванию (не возрастанию) их мощности:

$$s_1^w, s_2^w, \dots, s_{k_w}^w, \tag{6}$$

$$s_1^b, s_2^b, \dots, s_{k_b}^b \tag{7}$$

Полагая основными сегменты белого и черного цветов с наибольшим числом пикселей  $s_1^w$  и  $s_1^b$ , отнесем сумму пикселей всех остальных найденных в изображении сегментов к сумме  $s_1^w$  и  $s_1^b$ :

$$r = \frac{\sum_{i=2}^{k_w} s_i^w + \sum_{i=2}^{k_b} s_i^b}{s_1^w + s_1^b} \tag{8}$$

Полученное значение  $r$  можно принять за оценку зашумленности бинаризованного изображения. Причем значение (8), полученное при помощи (6) и (7), найденных по методу разрастания со схемой, представленной на рис. 5 а будем считать оценкой шума типа I, и обозначим  $r_I$ . Аналогичное значение, найденное с использованием схемы на рис. 5 б, обозначим  $r_{I+II}$ , и будем считать оценкой шумов типа I и II одновременно.

Если по результатам сегментации изображения  $k_w = k_b = 1$ , то соответствующее значение  $r = 0$ , и шум в изображении отсутствует. Практическая обработка изображений льдин, полученных в ледовом бассейне, показала, что обычно  $r_I < r_{I+II}$ , т.е. в бинаризованном изображении присутствуют «выбросы», соединенные с основным сегментом диагональными «мостиками».

Блоковая фильтрация (2)-(4) изображения в градациях серого цвета способна приводить к сокращению значений  $k_w$  и  $k_b$ , найденных путём

применения алгоритма разрастания на бинаризованном отфильтрованном изображении.

**5. Результаты сегментации изображений моделированного льда**

Блоковая фильтрация изображения снижает его фактическое разрешение, что может привести к исчезновению мелких деталей, но позволяет также снизить значение параметра (8), оценивающего зашумленность.

Значения  $r_I$  и  $r_{I+II}$  оказались слишком малы, чтобы было удобно привести их на графике. Вместо этого на рис. 7 приведены графики значений  $\sum_{i=2}^{k_w} s_i^w + \sum_{i=2}^{k_b} s_i^b$ , полученных при разных типах фильтрации и размерах блоков для изображений, приведенных на рис. 1 и 2.

Из приведенных графиков видно, что число пикселей изображения, отнесенных к шуму, имела выраженную тенденцию к снижению с ростом размера блока фильтрации  $n$ . Из графиков также следует, что «выбросы» цвета, соединенные с основным сегментом лишь диагональными «мостиками», занимают ощутимую долю во всем шуме. С точки зрения снижения шума лучше всего показали себя фильтры по среднему в блоке (2) и по среднему гармоническому в блоке (4). Фильтрация по медианному значению (3) в блоке, наоборот, показала себя не лучшим образом. Учитывая дополнительные затраты машинного времени на сортировку, неизбежные при использовании этого фильтра, можно признать его неподходящим для наших целей.

Минимальные значения размера блоков фильтрации, приводившие к  $k_w = k_b = 1$ , т.е. к полному исчезновению шума, оказались различными для разных изображений и разных типов фильтров. Эти значения приведены в Таблице 1.

Скорость уменьшения шума в изображении с увеличением размера блока  $n$  по-видимому зависит от многих факторов, включая характер края льдины, наличие вспышки при фотосъемке и других. Этот вопрос требует дальнейшего подробного изучения.

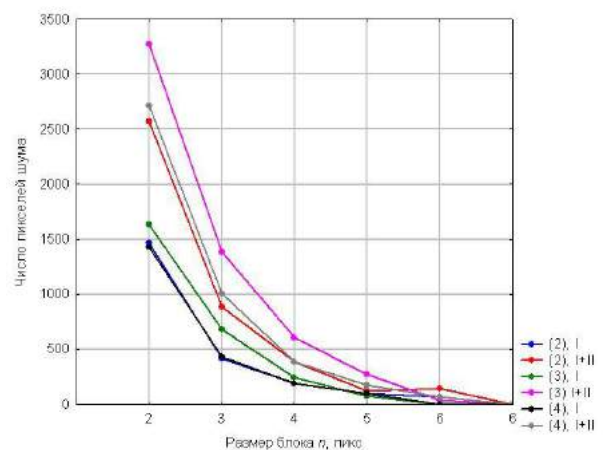


Рис. 7. а)

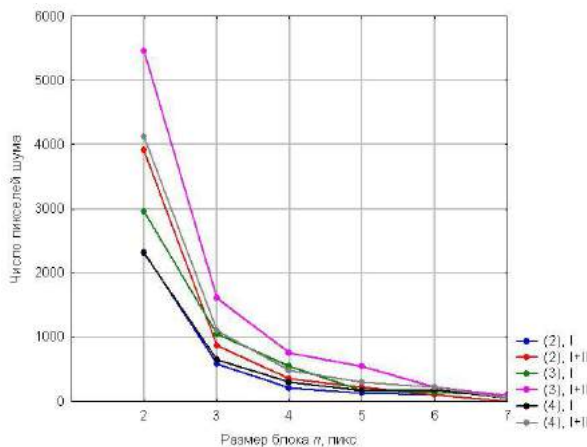


Рис. 7. b)

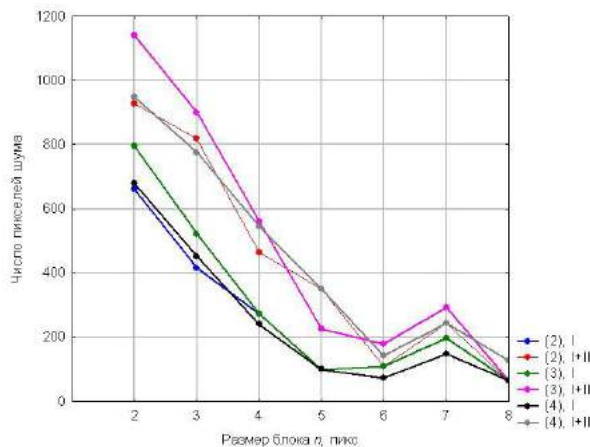


Рис. 7. d) Значения  $r_I$  и  $r_{(I+II)}$  в зависимости от выбранных типа фильтрации и размера блока для изображений, приведенных на: а) рис. 1а; б) рис. 1б; с) рис. 2а; д) рис. 2б.

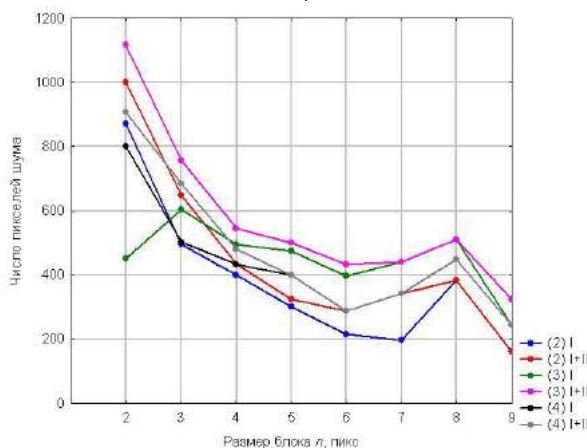


Рис. 7. c)

Таблица 1. Минимальные значения параметра фильтрации  $n$ , исключающие последующее появление шума вблизи границ льдин.

Тип распознаваемого шума	Способ фильтрации	Рис 1а)	Рис 1б)	Рис 2а)	Рис 2б)
I	По среднему (2)	7	7	11	10
	По медиане (3)	6	8	17	10
	По среднему гармоническому (4)	6	10	14	10
I+II	По среднему (2)	7	7	10	10
	По медиане (3)	6	8	18	10
	По среднему гармоническому (4)	7	10	14	10

**Заключение**

Края моделированных льдин и ледовых полей имеют рыхлую форму, часто являются обводненными или частично притопленными. Поверхность моделированных льдин на изображении имеет зернистую структуру, водная поверхность на изображении, как правило, имеет световые блики. Вследствие перечисленных особенностей, непосредственное применение стандартных алгоритмов сегментации затруднено, а бинаризованное изображение может содержать шум.

В статье дана классификация выявляемого при бинаризации границы раздела «лед-вода» шума на два класса. Выявление шума предложено осуществлять при помощи метода разрастания

области по значениям интенсивности пикселей. Модификация этого алгоритма для бинарных изображений, предложенная в настоящей статье, позволила ускорить процесс сегментации.

Исследование показало, что при использовании пороговой бинаризации Оцу к обработке изображений моделированных льдин возникает существенная доля как шума, полностью погруженного в сегмент противоположного цвета (блики, зернистость), так и «выбросов» в сегменты противоположного цвета, соединенных с сегментами своего цвета лишь диагональными «мостиками» (обводненность краев льдины).

Для устранения шума в статье предложено использовать предварительную блоковую фильтрацию изображений в градациях серого по среднему, медиане и среднему гармоническому

значений интенсивности в блоке. При этом наилучший результат для исследованных изображений продемонстрировала блоковая фильтрация по среднему значению интенсивности. Тем не менее, размер блока, позволивший полностью устранить шум в изображении, оказался достаточно велик: от 6 пикселей.

Увеличение размера блока предварительной фильтрации, как правило, ведет к снижению шума.

В работе показано, что метод разрастания области по интенсивности пикселей является эффективным инструментом сегментации изображений краев моделированного ледового поля при условии использования специальных методов предобработки.

#### Благодарности

Публикация выполнена в рамках государственного задания № 2.11665.2018/11.12 Минобрнауки России. The research work was supported by The Ministry of Education and Science of the Russian Federation (task # 2.11665.2018/11.12).

#### Литература

1. Экспериментальный аппаратно-программный комплекс спутникового мониторинга и прогноза ледовой обстановки / Миронов Е.У., Смирнов В.Г., Бычкова И.А., Клячкин С.В., Дымент Л.Н., Захваткина Н.Ю., Май Р.И., Гузенко Р.Б., Саперштейн Е.Б., Михальцева С.В., Платонова Е.В., Старцев Л.А. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 2 (112), С. 15-26.
2. Спутниковый мониторинг морских льдов / Смирнов В.Г., Бушуев А.В., Бычкова И.А., Захваткина Н.Ю., Лошилов В.С. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 2 (85). С. 62–76.
3. Dierking, W. Mapping of different sea ice regimes using images from Sentinel-1 and ALOS synthetic aperture radar / W. Dierking // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2010. Vol. 48, № 3. С. 1045–1058.
4. Haralick, Robert M. Image segmentation techniques / Robert M. Haralick and Linda G. Shapiro // Comput. Vision Graphics Image Process. 1985. № 29. С. 100-132.
5. Pratt, William K. Digital Image Processing, 4<sup>th</sup> ed. Los Altos, California: PixelSoft Inc., 2007, 782 p.
6. Linda G. Shapiro, George C. Stockman. Computer vision. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001, 609 p.
7. К.В. Ежова. Моделирование и обработка изображений / Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2011. 93с.
8. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms / N. Otsu // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. Vol. 9. № 1. С. 62–66.
9. Критерии оценки качества в задаче автоматизированной настройки алгоритмов бинаризации / Д. П. Николаев, А. А. Сараев // Труды ИСА РАН, 2013. Том 63, №3. С. 85-94.

#### References

1. Mironov E.U., Smirnov V.G., Bychkova I.A., Klyachkin S.V., Dyment L.N., Zahvatkina N.YU., Maj R.I., Guzenko R.B., Sapershtejn E.B., Mihal'ceva S.V., Platonova E.V., Starcev L.A. Eksperimental'nyy apparatno-programmnyy kompleks sputnikovogo monitoringa i prognoza ledovoj obstanovki [An experimental]. Problemy Arktiki i Antarktiki. № 2 (112), 2017, p. 15-26.
2. Smirnov V.G., Bushuev A.V., Bychkova I.A., Zahvatkina N.YU., Loshchilov V.S. Sputnikovyy monitoring morskikh l'dov. Problemy Arktiki i Antarktiki. № 2 (85), 2010, p. 62–76.
3. W. Dierking. Mapping of different sea ice regimes using images from Sentinel-1 and ALOS synthetic aperture radar. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Vol. 48, no. 3, 2010, pp. 1045–1058.
4. Robert M. Haralick and Linda G. Shapiro. Image segmentation techniques. Comput. Vision Graphics Image Process. № 29, 1985, p. 100-132.
5. Pratt, William K. Digital Image Processing, 4<sup>th</sup> ed. Los Altos, California: PixelSoft Inc., 2007, 782 p.
6. Linda G. Shapiro, George C. Stockman. Computer vision. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001, 609 p.
7. K.V. Ezhova. Modelirovanie i obrabotka izobrazhenij. Spb: NIU ITMO, 2011. 93 p.
8. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Vol. 9. № 1, 1979, p. 62–66.
9. D. P. Nikolaev, A. A. Saraev. Kriterii ocenki kachestva v zadache avtomatizirovannoj nastrojki algoritmov binarizac. Trudy ISA RAN. Vol. 63, №3, 2013, p. 85-94.



## Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Электронное сетевое (ISSN 2588-0233) и печатное (ISSN № 2073-7173) издание  
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3  
**e-mail: mit-journal@mail.ru www.morintex.ru**

### ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов.

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте **www.morintex.ru**
3. Одна рецензия на публикуемую статью по соответствующей специальности с подписью, заверенной гербовой печатью. При междисциплинарном исследовании предоставляются две рецензии от экспертов различных областей наук по соответствующей тематике.
4. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
5. Лицензионный договор
6. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) могут быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу **mit-journal@mail.ru** (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

По желанию авторов, документ 1 в бумажной версии и компакт-диск с документами 2 и 3 могут быть либо присланы по почте в адрес редакции, либо доставлены непосредственно в редакцию, либо переданы одному из членов редколлегии.

**На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.**

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом может быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

**Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.**

**Стоимость публикации 9000 рублей по выставяемому по запросу счету.**

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

Главный редактор научного журнала  
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

**Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ****Гайкович А. И.****Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.**

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

**Архипов А. В., Рыбников Н. И.****Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.**

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

**Караев Р. Н., Разуваев В. Н., Фрумен А. И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.**

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

**Шауб П. А.****Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.**

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

**Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.**

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 г. 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**