

# **МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

1001101001101111001010011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010001010101  
00110101101110111000100111001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010  
1001000111100101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110  
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100  
00110101001101011000010110100101010001001000011111100110011001101011001110000001110010100101  
1101110011001010111101010101001010011100010110010100110010101111001010111100101101001010  
0000111010100111100011011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001  
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100  
00101001110011010011100010100101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010

**№ 4(34) Т.1 2016**



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



# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 4 (34) Т.1 2016 [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru), ISSN № 2073-7173

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, СПбГМТУ

## 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., исполнительный 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

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, СПбГМТУ

С.П. Столяров, д.т.н., профессор, декан факультета корабельной энергетики и автоматики, СПбГМТУ

В.Н. Тряскин, д.т.н., профессор, проректор, СПбГМТУ по учебной работе

А.К. Филимонов, д.т.н., профессор, проректор СПбГМТУ по научной работе

## Редакционная коллегия

### Заместители главного редактора

А.И. Гайкович, д.т.н., профессор, СПбГМТУ

А.И. Фрумен, к.т.н., профессор, СПбГМТУ

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

### Члены Редколлегии

А.В. Алексеев, д.т.н., профессор, СПбГМТУ

А.Е. Богданов к.т.н. — ОАО «Системы управления»

Р.В. Борисов д.т.н. профессор, СПбГМТУ

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

Международный Университет, Майами, США

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

А.Н. Дядик, д.т.н., профессор, СПбГМТУ

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

Ю.И. Нечаев, д.т.н., профессор, С СПбГМТУ

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

В.Ю. Семенова, д.т.н., профессор, СПбГМТУ

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

О.В. Третьяков, д.т.н., доцент, НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ

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



# MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 4 (354) V.1 2016 [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru) ISSN 2073-7173

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"

G.N. Muru, PhD, Executive Director, 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

V.N. Trjaskin, Doctor of Engineering, Professor, Vice-Rector for Education, Saint-Petersburg State Marine Technical University

A.K. Filimonov, Doctor of Engineering, Professor, Vice-Rector for Research, Saint-Petersburg State Marine Technical University

## Editorial Staff

### Deputy Chief Editors

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

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

A. E. Bogdanov, PhD, JSC "Control Systems"

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

O. V. Tretyakov, Doctor of Engineering, Associate Professor, Institute of Shipbuilding and armaments of Russian Navy

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



**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
<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ</b>	
<b>Ляховицкий А. Г.</b> Особенности проектирования многокорпусных судов .....	12
<b>Кириллов М., В., Торопов Е. Е., Фрумен А. И.</b> Освоение северных морей России с помощью автоматизированного терминала. Проблемы и решения .....	16
<b>ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА</b>	
<b>Крыжевич Г. Б.</b> Усилия в стыковых устройствах и напряжения в конструкциях, возникающих при монтаже плавучих буровых платформ наплывным способом .....	20
<b>Островская Н. В., Рутман Ю. Л., Грунин В. В.</b> Сопоставление результатов конечно-элементного расчета характеристик пластического демпфера с экспериментом .....	28
<b>Тряскин В. Н., Рюмин С. Н., Дехтярь И. В.</b> Методы и алгоритмы геометрического и конструктивного моделирования в задачах проектирования и расчета прочности конструкции корпуса кораблей и судов .....	35
<b>Плотников К., Зуев П. С.</b> Определение характеристик нетто поперечного сечения профильного проката в задачах автоматизированного проектирования корпуса судов .....	44
<b>Бесядовский А. Р., Морозов А. Ю.</b> Установка для моделирования нестационарных процессов в аэродинамической трубе .....	52
<b>Нечаев Ю. И., Петров О. Н.</b> Контроль динамической непотопляемости в условиях адаптации и самоорганизации аварийного судна на нерегулярном волнении .....	57
<b>Семенова В. Ю., Киав Тхурв</b> Определение нелинейный сил второго порядка, обусловленных суммой частот, возникающих при изолированных поперечно-горизонтальных, вертикальных, бортовых колебаниях контура и их взаимодействии .....	65
<b>Семенова В. Ю., Аунг Мьо Тханг</b> Расчеты амплитудно-частотных характеристик при совместной качке двух судов на регулярном волнении в условиях мелководья .....	76
<b>Борисов Р. В., Лузянин А. А.</b> Формирование критерия погоды с учетом нерегулярности ветра и волн .....	87
<b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ</b>	
<b>Клещев А. А.</b> Мягкий вытянутый сфероид в плоском волноводе с твердым упругим дном, облучаемый импульсным звуковым сигналом .....	93
<b>Нечаев Ю. И., Лютин А. В.</b> Мультиагентное моделирование экстремальных ситуаций в бортовых интеллектуальных системах поддержки принятия решений .....	97
<b>Маламанов С. Ю., Павловский В.А.</b> Численное моделирование турбулентного течения ртути в однородном магнитном поле .....	105
<b>Павловский В. А., Чистов А. Л., Шестов К. В.</b> Моделирование течений в трубах с шероховатыми стенками .....	109
<b>Павловский В. А., Мишутинский Ю. Н., Неверов С. А.</b> Моделирование динамики истечения реального газа из резервуара .....	114
<b>Васильев Б. П., Легуша Ф. Ф., Разрезова К. В., Чижов Г. В.</b> Экспериментальные исследования пленочных термофонов .....	118

<b>Звягин П. Н., Войткунская А. Я.</b> Транспортная модель для системы навигации в Арктике ...	124
--	-----

***УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ***

<b>Голованова О. В., Солдатов А. В., Солдатов А. А.</b> Проблемы управления в судостроительном образовании .....	130
--	-----

<b>Волостных В. В., Иванкович Т. С., Иванкович А. В.</b> Инструментарий рефлексивного анализа динамики отечественного судостроения .....	135
--	-----

## CONTENTS

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

### **SHIP DESIGNING AND STRUCTURE**

<b>Lyakhovitsky A. G.</b> Features of design the mulyi-hull ships .....	12
<b>Kirillov M., V., Toropov E. E., Frumen A. I.</b> Development of Northern Sea of Russia by means of automated underwater terminals. Problem and solutions .....	16

### **THEORY OF SHIP AND STRUCTURES**

<b>Kryzhevich G. B.</b> Forces in mating devices and stresses in structures occurred during afloat assembling afloat floating drilling platforms .....	20
<b>Ostrovskaya N. V., Rutman Ju. L., Grunin V. V.</b> Comparison of final-element calculation results of the plastic damper characteristics to the experiment .....	28
<b>Trjaskin V. N., Rjumin S. N., Dehtjar' I. V.</b> Methods and algorithms of geometrical and structural modeling in the hull structures design / strength calculation of the ships and vessels .....	35
<b>Plotnikov K., Zuev P. S.</b> Net geometrical properties calculation of rolled stiffeners sections in computer aided ship structure design .....	44
<b>Besyadovskiy A. R., Morozov A. Yu.</b> Equipment for unsteady tests tunnel .....	52
<b>Nechaev Yu. I., Petrov O. N.</b> Dynamic unsinkability control during adaptation and self-organization of damaged ship on irregular waves .....	57
<b>Semenova V. Yu., Kyaw Thura</b> The determination of nonlinear forces of the second order due to the sum of frequencies during the sway, heav and roll of a two-dimensional body and their interaction .....	65
<b>Semenova V. Yu., Aung Myo Thant</b> The calculations of the response amplitude operators in the coupled of the ships on the regular waves in the shallow water .....	76
<b>Borisov R. V., Luzyanin A. A.</b> Experimental study of the influence of the dynamic waterline on the stability of the escort tugs .....	87

### **MATHEMATICAL MODELING**

<b>Kleshchev A. A.</b> Soft prolate spheroid in plane waterguide with hard elastic bottom irradiated by pulse second signal .....	93
<b>Nechaev Yu., Lyutin A. V.</b> Multi-agent simulation of the extreme situation in the onboard in intelligent decision support systems .....	97
<b>Malamanov S. Yu., Pavlovsky V. A.</b> Numerical modeling of turbulent flows mercury in uniform magnetic field .....	105
<b>Pavlovsky V., A., Chistov L. A., Shestov K. V.</b> Modeling turbulent flow in a rough pipe .....	109
<b>Pavlovsky V., A., Mishutinskiy Yu. N., Neverov S. A.</b> Modelling of real gas tank outflow dynamics .....	114
<b>Vasilev B. P., Legusha F.F., Razrezova K. V., Chizhov G.V.</b> Experimental investigations on film thermohones .....	118
<b>Zvyagin P.N., Voitkunskaja A. Ja.</b> Arctic transportation model for «smart navigation system» .....	124



**CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS**

<b>Golovanova O. V., Soldatov A. V., Soldatov A.A.</b> The problem of management in the shipbuilding education .....	130
<b>Volostnykh V. V., Ivankovich T. S., Ivankovich A. V.</b> Reflective analysis for Russian shipbuilding .....	135

## О ЖУРНАЛЕ

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

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

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

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

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

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

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

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

### Тематика

Тематика журнала соответствует следующим специальностям научных работников номенклатуры ВАК: кораблестроение (теория корабля и строительная механика, проектирование и конструкция судов, технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства, судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные), физические поля корабля, океана, атмосферы и их взаимодействие); информатика, вычислительная техника и управление (системный анализ, управление и обработка информации, автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, управление в социальных и экономических системах, математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей, системы автоматизации проектирования, теоретические основы информатики, математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)

### Основные направления

- Интеллектуальные технологии в проектировании кораблей и судов, компьютеризация процессов проектирования (управление и организация проектирования, системы автоматизированного проектирования). Морская история и техника.
- Интеллектуальные технологии в строительстве и ремонте кораблей и судов (перспективные технологии в строительстве и ремонте судов, автоматизированные системы подготовки производства, использование роботов).
- Интеллектуальные технологии в эксплуатации кораблей и судов (системы автоматизации кораблей и судов, автоматизированные системы управления, проблемы судовой эргономики, экология).
- Интеллектуальные технологии в прикладных исследованиях (математическое моделирование и компьютерный эксперимент, строительная механика, гидроаэродинамика, термодинамика, физические поля корабля).
- Интеллектуальные технологии в морской и судовой энергетике. Энергосберегающие технологии.
- Интеллектуальные технологии морского приборостроения.
- Искусственный интеллект в морских технологиях.
- Интеллектуальные технологии в маркетинговых исследованиях.
- Экономика и финансы в судостроении
- Кораблестроительное образование

## ABOUT JOURNAL

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

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

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

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

The magazine is intended for a wide range of scientists and specialists, as well as heads of scientific research and design organizations, industry, educational institutions, navy, as well as teachers, post-graduate 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.**

### Subject

The magazine subject corresponds to the following specialities of scientific workers cording 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

**ОБРАЩЕНИЕ РЕКТОРА**  
**ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный**  
**морской технический университет» (СПбГМТУ)**  
**к ЧИТАТЕЛЯМ научного журнала**  
**«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

Дорогие Читатели!



Приветствую Вас от имени Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. Университет уделяет исключительное внимание развитию интеллектуальной и инновационной составляющих в учебной и научной деятельности для подготовки высококвалифицированных специалистов, отвечающих всем современным требованиям науки и промышленности.

В университете успешно реализуется ряд крупных государственных программ, включая и «Программу стратегического развития *«Корабелки»*. Этому в сильной степени способствует успешное сотрудничество с Объединённой Судостроительной Корпорацией, в которой работают большинство наших выпускников, с научными организациями судостроительной отрасли, с Газпромом и Роснефтью.

Научный журнал «Морские интеллектуальные технологии» более восьми лет является той платформой, которая продвигает достижения ученых и преподавателей нашего университета для внедрения полученных научных результатов в промышленность, позволяет ознакомить с ними российскую и зарубежную научную общественность.

Особо хочу отметить, что в числе авторов статей журнала много молодых ученых, аспирантов и студентов.

Желаю всем Авторам и Читателям журнала благополучия и дальнейших творческих успехов в своей научной, инженерной и образовательной деятельности! **С Новым 2017 Годом!**

С уважением,

И.о. Ректора СПбГМТУ

доктор технических наук

Г.А. Туричин

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized initials and a surname.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

УДК 629. 12. 001.2.

### ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОКОРПУСНЫХ СУДОВ

Ляховицкий Анатолий Григорьевич

д.т.н., профессор

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

e-mail:alyakhov11@yandex.ru

#### Аннотация

В статье рассмотрены особенности проектирования многокорпусных судов. Многокорпусные суда, в отличие от традиционных однокорпусных, представляют собой систему несколько корпусов, расположенных под свободной поверхностью воды, объединенных между собой одной надводной платформой. Особенности их проектирования связаны с тем, что подводная и надводная части многокорпусных судов проектируются для достижения разных конечных целей. Это открывает новые возможности при проектировании таких судов, которые не могут быть обеспечены в проектах традиционных однокорпусных судов. Состоящая из нескольких корпусов подводная часть судна обеспечивает высокие мореходные качества, как за счет формы, так и взаимного расположения корпусов, Единая надводная платформа, объединяющая подводные корпуса, обеспечивает повышенную площадь для размещения грузов и пассажиров, в том числе и удобство размещения пассажиров. Приведена информация по различным типам спроектированных и построенных многокорпусных судов. Эта информация проиллюстрирована рисунками спроектированных или построенных многокорпусных судов различных типов и различного назначения. Рассмотрение рисунков иллюстрирует и облегчает понимание различия в подходах к проектированию многокорпусных судов. Показано, что площадь надводной платформы многокорпусного судна может значительно превышать площади любого из подводных корпусов и иметь различное соотношение длины и ширины. Проектирование системы движущихся под свободной поверхностью корпусов основано на принципах гидродинамики судна.

**Ключевые слова:** проектирование, судно, корпус, многокорпусное, однокорпусное, подводная, надводная, свободная, поверхность, площадь, мореходность, гидродинамика, платформа, длина, ширина, принцип

### FEATURES OF DESIGN THE MULTI-HULL SHIPS

Lyakhovitsky Anatoly Grigorievich

the professor, Dr. Sci. Tech.,

State marine technical university of Saint-Petersburg

Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation

e-mail: alyakhov11@yandex.ru

#### Abstract

The article considered the features of design the multi-hull ships. The multi-hull ships, in contrast to traditional one-hull ships, produce the system of some submarine hulls consolidated to one above water platform. The features of design submarine hulls and above water platform design such ships which notable designs traditional one-hull ships. Some submarine hulls provide high sea keeping as for form, so and mutually disposition of hulls. One above water platform, consolidated submarine hulls, provide high area for dispose cargos and passengers including comfort dispose of passengers. Information of different type multi-hull ships is reduced. This information illustrated the drawings designer and building multi-hull ships. Consideration of drawings make easier destination in above water platform of multi-hull ship considerably exceeds correlation length and breath. Design of system submarine hulls foundation on principle hydrodynamics of ship.

**Key words:** design, feature, multi-hull ship, one-hull ship, type, platform, submarine, free surface, area, sea keeping, hydrodynamics, length, breath, principle

#### Введение

Особенности проектирования многокорпусных судов (МС) объясняются тем, что несколько (больше одного) корпусов, движущихся под свободной поверхностью воды, объединяются,

расположенной над водой единой платформой. Подчиненные достижению различных целей подводная и надводная части судна проектируются по-разному. К настоящему времени спроектированы и построены МС с числом подвод-

ных корпусов два, три, четыре и пять [ 1,2]. Большое внимание созданию МС уделяют за рубежом [3].

### 1. Катамараны

Простейший переход от однокорпусного к многокорпусному судну состоит в разделении подводной части корпуса на две части, т.е. переход к катамарану. На рис.1 показан катамаран.



Рис.1. Катамаран

Из рассмотрения этого рисунка, хорошо видно, что площадь надводной платформы существенно превышает наибольшую площадь ватерлинии подводных корпусов. Для примера, приведем площади и их соотношение для отечественного катамарана «Анатолий Угловский», в создании и опытной эксплуатации которого принимал участие автор статьи. Площадь надводной платформы последнего катамарана – около 319 м<sup>2</sup>, а наибольшая площадь ватерлинии подводных корпусов – около 94 м<sup>2</sup>. Площадь надводной платформы превышает наибольшую площадь ватерлинии подводных корпусов более чем в три раза.

Катамараны получил наибольшее распространение среди коммерческих пассажирских судов. Они используются и для военных целей.

Во Франции принят на вооружение десантный катамаран-амфибия серии EDA-R



Рис.2. Десантный катамаран

Военно-морские силы Франции приняли на вооружение новейший десантный катамаран-амфибия серии EDA-R (Engin de Debarquement Amphibie). Катамаран построен по проекту CNIM на верфи Сант-Мало.



Рис.3. Десантный катамаран

Скорость этого уникального судна составляет 30 узлов. Французские ВМС рассчитывают получить восемь подобных судов. Помимо большой скорости катамараны серии EDA-R отличаются и универсальностью устройства платформы, которая позволяет перевозить и тяжелую бронетехнику, в том числе и танки.

Десантный катамаран EDA-R создан на базе прототипа катамарана L-Cat постройки CNIM (Constructions Industrielles de la Mediterranee). Контракт на постройку восьми катамаранов был заключен в июне 2009 года. Его сумма составила 125 млн евро.

Катамараны EDA-R предназначены для высадки живой силы и бронетехники. Длина катамарана составляет 80 метров, ширина 12 метров. Грузоподъемность - 80 тонн при скорости 18 узлов, пустой - до 30 узлов. Несколько зарубежных флотов заинтересовались этим десантным судном [4].

### 2. Тримараны

Дальнейшее увеличение корпусов МС привело к созданию тримаранов. Они содержат один основной центральный корпус и два вспомогательных боковых – аутригеры. Последние могут только обеспечивать остойчивость основному центральному корпусу (рис.4) ,



Рис.4. Военно-морской противолодочный беспилотник из композитных материалов

или одновременно увеличивать площадь надводной платформы (рис.5).



Рис.5. Пассажирский паром - тримаран

### 3. Квадримараны

Представление о квадримаране для обслуживания нефтедобывающих платформ дает рис. 6. Об этом судне было сообщено в 2005г [5]. Контракт на сумму более чем 25млн.\$ для детального проектирования, постройки, испытаний и поставки двух судов («LIDER» и «TENAZ») для перевозки работающих на нефтедобывающих платформах, был выигран на проводившемся тендере Lockheed Martin Corporation. Тендер проводила Мексиканская национальная нефтяная компания PEMEX (Mexico's national oil company).

По опубликованным данным суда «LIDER» и «TENAZ» продемонстрировали высокие мореходные качества, а большая ширина надводной платформы (с уникальным отношением длины к ширине – меньше двух) обеспечила возможность удобного расположения 150 перевозимых пассажиров. Эти суда длиной около 29м и шириной около 16м при суммарной мощности энергетической установки 2650 кВт развивают скорость хода 20 узлов. Важно также и то, что скорость незначительно теряется с увеличением волнения моря. При оценке эффективности использования таких судов их сравнивают с используемыми для таких же целей вертолетами. Нетрудно видеть, рассматривая внимательно рис. 6, что в подводной части судна реализованы две важных гидродинамических концепции: первая в том, что квадримаран представляет два сдвинутых в продольном направлении катамарана; вторая – каждый корпус выполнен с малой площадью действующей ватерлинии.



Рис.6. Квадримаран

### 4. Пентамараны

Среди современных МС наибольшее число подводных корпусов у пентамаранов. Концепция пентамарана, работы над которым ведутся до нашего времени, была запатентована в середине 1990-х годов. В работе [6] указано, что компания Vosper Private Group (генеральный менеджер Найджел Гии (Nigel Gee)) запатентовала концепцию пентамарана (Pentamaran concept) в 1995г.

В зарубежной литературе такой вариант иногда называют, пентамараном, иногда удлиненным однокорпусным судном, которое стабилизировано четырьмя аутригерами – спонсонами (sponsons).

Концепцию пентамарана можно определить как техническую реализацию многокорпусной схемы, состоящей из основного центрального удлиненного корпуса, в котором сосредоточена основная часть водоизмещения, стабилизированного четырьмя аутригерами – по два с каждого борта центрального корпуса.

Пентамараны, исходя из выше изложенного, можно рассматривать как модификацию тримарана, обеспечивающую патентоспособность такой гибридной многокорпусной схемы.



Рис.7. Пентамаран

### Заключение

Рассмотрены все основные типы современных МС: от катамарана до пентамарана. Отмечены особенности проектирования МС различных типов и использования гидродинамики корабля при выборе формы и взаимного расположения погруженных под свободную поверхность воды корпусов. Показано, что для надводной платформы МС возникает возможность создания увеличенной площади и благоприятного соотношения длины и ширины.

---

**Литература**

1. Ляховицкий А.Г., Йин Тхун. Скоростные пассажирские суда: проектные характеристики и тенденции развития. Морской вестник 2008. №2 (26). 19-22.
2. Lyakhovitsky A.G. Shallow Water and Supercritical Ships. Fair Lawn, NJ, USA: Backbone Publishing Co., 2007
3. Donaldson P. Monohull vs. Multihull. Wich design is best suited to which classes and tasks? Naval Forces, Vol. XXXVI, №V, 2015, p.29-32
4. [www.militaryparitet.com/teletype/data/ic\\_teletype/5972/](http://www.militaryparitet.com/teletype/data/ic_teletype/5972/)
5. Anon. New SWATH vessels for crew transport. Offshore Marine Technology, April 2005, p.23.
6. Moret J.A., Gee N.I. The Pentamaran Fast Ferry. The Ultimate Step Forward in Passenger and Cargo Transportation at High Speed. [www.yandex.ru](http://www.yandex.ru), поиск PENTAMARAN SHIPS, 31.01.10.

**References**

1. Lyakhovitsky A.G., Yin Tchun. Skorostnie passachirskie suda: proektnie charakteristi i tendenzii razvitiya. Morskoy vestnik 2008, №2 (26). 19-22.
2. Lyakhovitsky A.G. Shallow Water and Supercritical Ships. Fair Lawn, NJ, USA: Backbone Publishing Co., 2007
3. Donaldson P. Monohull vs. Multihull. Wich design is best suited to which classes and tasks? Naval Forces, Vol. XXXVI, №V, 2015, p.29-32
4. [www.militaryparitet.com/teletype/data/ic\\_teletype/5972/](http://www.militaryparitet.com/teletype/data/ic_teletype/5972/)
5. Anon. New SWATH vessels for crew transport. Offshore Marine Technology, April 2005, p.23.
6. Moret J.A., Gee N.I. The Pentamaran Fast Ferry. The Ultimate Step Forward in Passenger and Cargo Transportation at High Speed. [www.yandex.ru](http://www.yandex.ru), poisk PENTAMARAN SHIPS,, 31.01.10.



## ОСВОЕНИЕ СЕВЕРНЫХ МОРЕЙ РОССИИ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОДВОДНОГО ТЕРМИНАЛА. ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

**Кириллов Михаил Викторович**

зам. главного конструктора ЦКБ МТ «Рубин»  
191119, Санкт-Петербург, ул. Марата, д. 90  
E-mail: neptun@ckb-rubin.ru

**Торопов Евгений Евгеньевич**

к.т.н., главный конструктор ЦКБ МТ «Рубин»  
191119, Санкт-Петербург, ул. Марата, д. 90  
E-mail: neptun@ckb-rubin.ru

**Фрумен Александр Исаакович**

к.т.н., профессор  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: grossfrum@post.ru

### Аннотация

Предложена система погрузки-выгрузки углеводородного сырья с берегового терминала на судно с помощью автоматизированного подводного терминала (АПТ), устанавливаемого на глубинах от 50 до 500 метров на значительном удалении от береговых баз с развитой инфраструктурой. Такая система с точки зрения, как экологической, так и экономической является наиболее приемлемой для северных морей России, покрытых более девяти месяцев в году льдом и содержащих более 1/3 всех запасов нефти и более 1/2 газа. Разработаны элементы АПТ, позволяющие проводить морские операции при волнении моря до пяти баллов. Схема предусматривает постоянное соединение троса от лебедки, расположенной на вспомогательном бую, с всплывающей частью АПТ, что значительно уменьшает время операций соединения - рассоединённые АПТ с танкером. В период отсутствия судна предусматривается циркуляция подогретого нефтепродукта по замкнутому контуру.

**Ключевые слова:** подводный терминал, гибкий трубопровод, опорное основание, буй, Арктические моря, система погрузки-выгрузки

## DEVELOPMENT OF NORTHERN SEAS OF RUSSIA BY MEANS OF AUTOMATED UNDERWATER TERMINAL. PROBLEMS AND SOLUTIONS.

**Kirillov Mihail Viktorovich**

deputy Chief Designer, Central Design Bureau for Marine Engineering "Rubin"  
191119 Saint Petersburg, 90, ul. Marata  
E-mail: neptun@ckb-rubin.ru

**Toropov Evgenij Evgen'evich**

PhD, Chief Designer, Central Design Bureau for Marine Engineering "Rubin"  
191119 Saint Petersburg, 90, ul. Marata  
E-mail: neptun@ckb-rubin.ru

**Frumen Alexandr Isaakovich**

Professor, PhD, Department of structural mechanics of ships,  
State marine technical university  
e-mail: grossfrum@post.ru

### Abstract

A loading-unloading system for hydrocarbons from an on-shore terminal to a vessel by means of automated underwater terminal (AUT) installed at the depth of 50 to 500 metres at a considerable distance off the shore bases with well-developed infrastructure is suggested. The system can be considered to be the most suitable from both ecological and economic points of view, for the Northern seas of Russia are known to be covered with ice for more than 9 months a year and contain more than 1/3 of oil and more than 1/2 of gas reserves. The AUT elements allowing operations in seas up to 5 points on the scale have been developed. The system provides constant connection of the cable/tether from the winch on a supplementary buoy with an emerging AUT part which results in considerable time saving of AUT connection-disconnection with a tanker. In the absence of a vessel heated petroleum products circulate along a closed circuit.

**Keywords:** underwater terminal, flexible tubing, the main base, buoy, Arctic seas, a loading-unloading system

**Введение**

Акватории северных морей России содержат уникальные и крупнейшие месторождения нефти и газа. Только в Карском и Баренцевом морях около пятидесяти различных место-рождений (рис. 1), которые содержат более 1/3 всех запасов нефти и более 1/2 газа. Видно, что глубины от 50 до 500 метров занимают более 60 % их площади. Имеются также районы с необходимыми условиями для установки АПТ и в море Лаптевых, и в Восточно-Сибирском море. Освоение имеющихся там месторождений относится к более отдаленным перспективам.

Разработка таких место-рождений сильно осложняется рядом природных факторов.

К основным из них относятся:

- наличие ледового покрытия толщиной от 0.5 метров и более в течении девяти месяцев в году;
- значительная протяженность относительного мелководья от береговых баз с развитой инфраструктурой;
- наличие подвижки ледовых полей и довольно часто проявляющееся морское волнение;
- низкие температуры зимой (до  $-60C^0$ ) и летом;
- повышенная чувствительность экологии Севера к возможным нарушениям безопасности при разработке и эксплуатации месторождений;
- значительная удаленность большинства месторождений от мест переработки и потребления сырья.

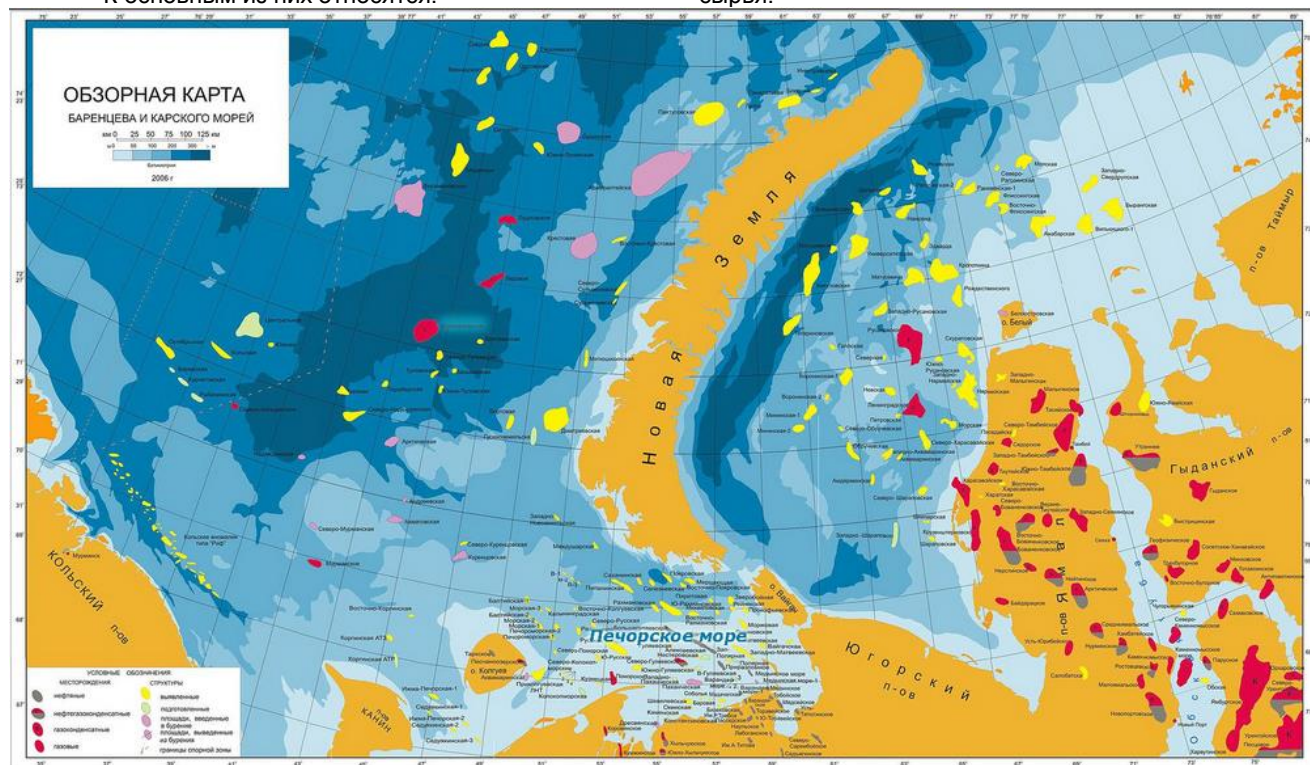


Рис. 1. Карта месторождений в Баренцевом и Карском морях.

**Решение.** Большинство из этих проблем может быть решено с помощью автоматизированного подводного терминала (АПТ), предназначенного для перекачки нефтепродуктов с берегового терминала на нефтеналивные танкеры вместимостью D ~ 90 тысяч тонн в ледовых условиях Северного морского пути [1]. Предполагается, что расстояние от берегового резервуара до АПТ, ориентировочно составляет 5000 м, а глубина установки от 50 до 500 метров,

АПТ реализует при загрузки-выгрузки углеводородного сырья на транспортные суда следующие основные технологические операции: определения место-нахождения терминала; всплытие-погружение всплывающей части АПТ; автоматизированную стыковку-расстыковку с грузовой системой транспортного судна; загрузку-выгрузку углеводородного сырья и проведение операций по сервисному обслуживанию АПТ.

Загрузочная система предназначена для работы в битом льду арктического шельфа. На рисунках 2 и 3 показаны схемы устройства АПТ для глубин моря от 150 до 500 метров в присутствии и отсутствии танкера.

Транспортировка текучей среды (нефтепродуктов) осуществляется с помощью расположенных на берегу насосов через опорное основание блока-манифольта, (3) гибкого восходящего трубопровода (1), подвешенного в состоянии натяга с помощью погружного буя (2), через вертлюг (6) горизонтальный гибкий трубопровод около нулевой плавучести (4) и конечное Устройство (5) имеющее гибкий шланг (4) на расстоянии примерно 100 метров от оконечного устройства (5) крепится к вспомогательному бую (7), закрепленному на дне с помощью опоры (8) на расстоянии 50-100 метров от опорного основания (3).

Погружной буй (2), гибкий трубопровод (4) и вспомогательный буй (7) располагаются на глубине 50 метров что позволяет им избегать контакта с ледяными полями и торосами.

При подходе танкера к автоматизированному подводному терминалу (АПТ), который он находит с помощью акустических маячков, расположенных на вспомогательном бую (7), подается команда на включение погружного мотора (10, фиг. 3) который с помощью лебедки (9) отпускает гибкий трубопровод (4) позволяя ему и конечному устройству (5) всплыть на поверхность. После этого конечное

устройство (5) захватывается краном судна и прикрепляется к нему для работы (фиг. 2). Подвижность элементов гибкого трубопровода (4), наличие вертлюга (6) и специального хомута, обеспечивающего постоянное соединение тросом вспомогательного буйа (7) с гибким трубопроводом (4), позволяет вести операции загрузки-выгрузки нефтепродуктов (как показали расчеты) при волнении моря до 4-5 бал-

лов. Пятно маневрирования танкера при этом составляет ~150 метров.

При окончании операции загрузки-выгрузки закрываются клапана конечного устройства (5) и опорного основания-монифольда (3). Конечное устройство (5) опускается в воду и после команды с помощью лебедки и погружного электромотора притягивается вспомогательному бую (7) (Рис. 4).

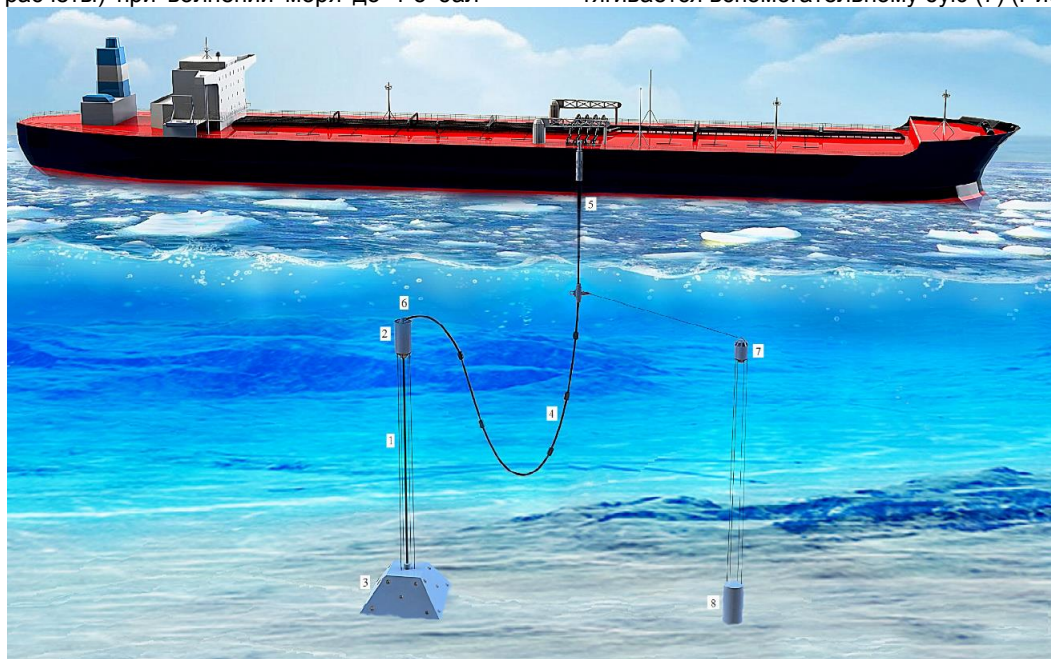


Рис. 2. Схема, устройства АПТ для глубин моря свыше 150 м:  
 1 – вертикальный гибкий трубопровод; 2 – основной буй;  
 3 – опорное основание; 4 – горизонтальный гибкий трубопровод;  
 5 – всплывающая часть АПТ; 6 – вертлюг; 7 – вспомогательный буй;  
 8 – вспомогательное основание.

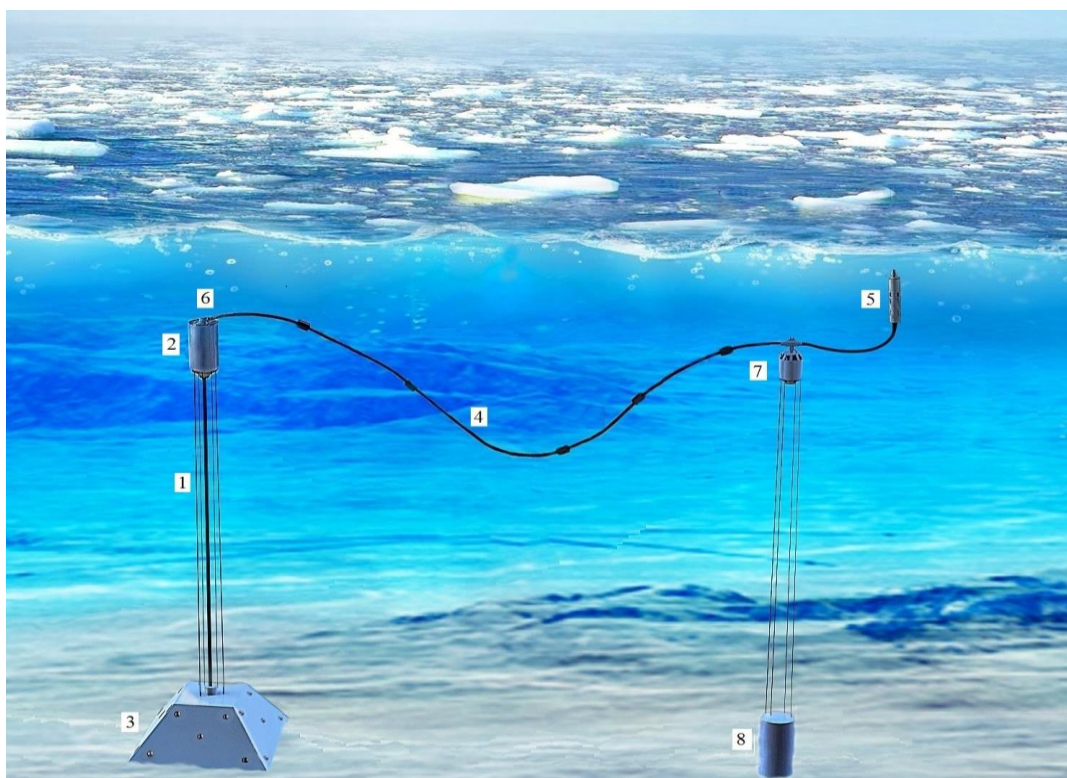


Рис. 3 – Схема, иллюстрирующая крепление свободного конца шланговой линии к вспомогательному бую при отсутствии судна.

В отличие от [3] схема предусматривает постоянное соединение троса от лебедки, расположенной на вспомогательном бую, с всплывающей частью АПТ, что значительно уменьшает время операций соединения - рассоединённые АПТ с танкером.

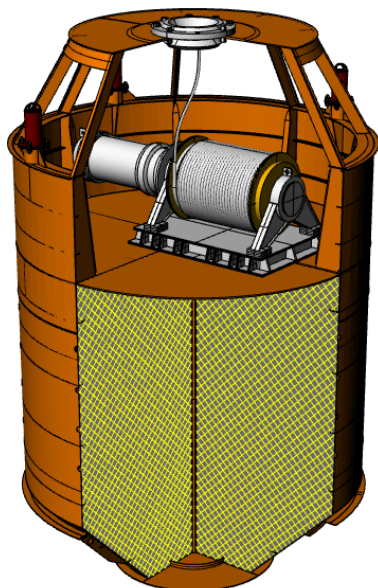


Рис. 4. Схема вспомогательного буя.

Рассмотрено два варианта исполнения конструкций основного и вспомогательного буюв.

- Прочная оболочка с ребрами жесткости.
- Оболочка, заполненная полистиролбетоном (рис. 4).

Второй вариант является более предпочтительным с точки зрения эксплуатационной надежности.

Полистиролбетон (ГОСТ Р 51263) представляет собой композиционный материал, в состав которого входит портландцемент и его разновидности, пористый наполнитель, в качестве которого выступают гранулы вспененного полистирола. Плотность полистиролбетона, как правило, варьируется в пределах от 150 кг/м<sup>3</sup> до 600 кг/м<sup>3</sup>. В проекте принята 350 кг/м<sup>3</sup>.

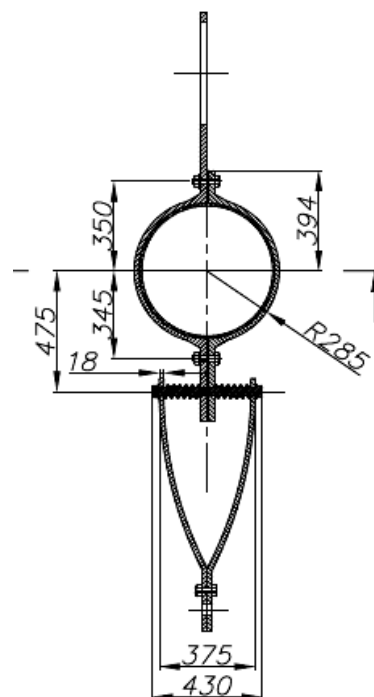


Рис. 5. Устройство соединения троса с гибким трубопроводом (хомутом).

Для соединения троса лебедки с гибким горизонтальным трубопроводом (шлангом) предлагается использовать специальное устройство - хомут (рис. 5). Конструкция хомута обеспечивает «мягкую» посадку шланга на вспомогательный буй (7) и препятствует опутыванию шланга тросом при маневрировании судна.

В период отсутствия судна (рис. 3) предусматривается циркуляция подогретого нефтепродукта по замкнутому контуру.

Отметим, что конструкция тросовой системы, соединяющей основной буй (2) с опорным основанием (3) обеспечивает его защиту от тралов [2].

**Заключение.** Экономические расчеты показывают, что уже, начиная с 8-го заправляемого танкера типа Афрамас, компания, эксплуатирующая АПТ, будет получать значительно большую прибыль, чем при существующих схемах транспортировки нефтепродуктов.

### Литература

1. Караев Р.Н., Разуваев В.Н., Фрумен А.И. Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. СПб, ООО «НИЦ «Моринтех», 2012. -352с.
2. Патент на полезную модель № 166029 от 09.03.2016г. Защитное устройство для гибкого восходящего трубопровода.
3. Патент на полезную модель № 2405711, от 10.12.2010, Загрузочная система.

### References

1. Karaev R.N., Razuvaev V.N., Frumen A.I. Tehnika i tehnologija podvodnogo obsluzhivaniya morskikh neftegazovykh sooruzhenij. SPb, ООО «NIC «Morinteh», 2012. -352s.
2. Patent na poleznuju model' № 166029 ot 09.03.2016g. Zashhitnoe ustrojstvo dlja gibkogo voshodjashhego truboprovoda.
3. Patent na poleznuju model' № 2405711, ot 10.12.2010, Zagruzochnaja sistema.

**ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА**

К 629.563.21.002.72

**УСИЛИЯ В СТЫКОВЫХ УСТРОЙСТВАХ И НАПРЯЖЕНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ МОНТАЖЕ ПЛАВУЧИХ БУРОВЫХ ПЛАТФОРМ НАПЛЫВНЫМ СПОСОБОМ****Крыжевич Геннадий Брониславович**

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

**Аннотация****Я**

В работе предложены методы оценки усилий в стыковочном устройстве, используемом для монтажа ППБУ в морских условиях наплавным способом с деформированием конструкций соединяемых блоков, а также расчета возникающего при монтаже напряженного состояния конструкций ППБУ. Для определения действующих на конструкции усилий и параметров вызванного ими напряженного состояния используются методы теории вероятностей. На основе разработанных методов можно определить важнейшие параметры монтажной операции (в частности, ту часть веса верхнего строения платформы (ВСП), которую необходимо передавать на опорное основание для принудительного совмещения стыкуемых кромок ВСП и опорного основания) и обеспечить надежность и безопасность ее проведения за счет выполнения направленных на это расчетов в процессе разработки проекта морской транспортно-монтажной операции. Проанализированы особенности процесса стыковки верхнего строения с опорным основанием платформы и возможность его неустойчивого развития.

**Ключевые слова:** плавучие буровые установки, стыковочные устройства, монтаж морских платформ в море.

**FORCES IN MATING DEVICES AND STRESSES IN STRUCTURES OCCURRED DURING AFLOAT ASSEMBLING OF FLOATING DRILLING PLATFORMS****Kryzhevich Gennady Bronislavovich**

the professor, Dr.Sci.Tech.,  
the professor of strength  
of ship chair in St.Petersburg State Marine Technical University  
190008 St.Petersburg 3 Lotsmanskaya, Russian Federation  
e-mail: morintex\_spb@mail.ru

**Abstract**

The paper proposes methods for evaluating forces in a mating device used for afloat assembling of floating semisubmersible drilling platforms in sea conditions with deformation of mated unit structures, as well as recalculation of the stressed state occurred in the course of assembling. To evaluate structural forces and parameters of the stressed state caused by these forces, methods of the probability theory are used. Based on the developed methods, it is possible to evaluate the most important assembling parameters (in particular, the top structure weight portion that shall be transferred to the substructure for forced coincidence of the mated edges of the platform top structure and the substructure) and provide assembling reliability and safety through calculations performed during development of the marine transport-and-mounting operation. Specific features of the top structure mating with the platform foundation, as well as a possibility of the process unstable development are analyzed.

**Key words:** floating drilling platforms, mating devices, assembling of offshore platforms

**Введение**

Метод надвига на плаву используется для монтажа плавучих и стационарных платформ более 30 лет [1]. Он не требует использования кра-

нов большой грузоподъемности и поэтому обычно безальтернативен, когда вес верхних строений превышает 10 тыс. тонн. Его суть состоит в том, что на месте монтажа платформы судно, перевозящее ВСП, располагается между колоннами

раскрепленного на акватории опорного основания. После того как судно пришвартовано выполняется предварительное наведение стыкуемых блоков (совмещение опор ВСП с опорами основания) путем позиционирования в горизонтальной плоскости одного блока относительно другого. Для наведения ВСП на опорное основание используются буксиры, лебедки или комбинация этих технических средств. Наведение производится по реперным точкам или на основе индикации, обеспечиваемой оптическими или лазерными системами.

Затем начинается фаза стыковки, при которой ВСП с помощью операции балластировки судна (или дебалластировки опорного основания) опускается на колонны опорного блока. Часть веса верхнего строения (обычно 10-30%) постепенно переносится на опорное основание до взаимного совмещения стыкуемых контуров этих блоков благодаря их деформированию, после чего операция балластировки (дебалластировки) временно прекращается и выполняется соединение блоков, осуществляемое обычно с помощью сварки. После этого производится полная посадка ВСП на опорное основание и завершение соединения блоков.

Сложность и уникальность проведения транспортно-монтажных операций наплавным способом в значительной мере обусловлена необходимостью стыковки крупногабаритных супермодулей (ВСП и опорного основания) с высокой точностью (с обеспечением технологического зазора по свариваемым кромкам ВСП и основания по стыкуемым контурам всех шести колонн не более  $2 \div 3$  мм, и разностенностью вертикально расположенных стыкуемых элементов – пластин, оболочек ребер жесткости и т.д., не превышающей величин такого же порядка). Такие значения допусков на стыковку достигаются путем использования специальных стыковочных устройств с конусами (рис. 1), позволяющих выполнить принудительное деформирование блоков платформы силами веса ВСП.

Целью работы является разработка методов оценки усилий в стыковочном устройстве и напряженного состояния конструкций ППБУ, вызванного принудительным деформированием блоков платформы, обеспечивающим достижение установленных допусков на стыковку, а также способов определения той части веса верхнего строения платформы, которую необходимо передавать на опорное основание для принудительного совмещения стыкуемых кромок ВСП и опорного основания.

### Усилия в стыковочных устройствах

Надежность и безопасность проведения операции стыковки ВСП с колоннами нижнего основания в значительной степени предопределяется точностью расчетов усилий, возникающих в стыковочных устройствах. Мерами, осуществляемыми в процессе изготовления и транспортировки супермодулей морской платформы, монтажа на них стыковочных устройств ограничивается несо-

осность конусных поверхностей верхней и нижней частей каждого из стыковочных устройств величиной технологического допуска. Он составляет обычно величины порядка 25 - 75 мм. Это расстояние между осями конусов верхней и нижней частей стыковочного устройства, уменьшаемое почти до нуля в процессе стыковки главным за счет упругого деформирования конструкций опорного основания, а также угол между осью и образующей конуса  $\beta$  являются основными параметрами, влияющими на усилия в стыковочных устройствах, развивающиеся при монтаже наплавным способом.

Анализ усилий, возникающих в стыковочных устройствах, необходим для последующего решения двух основных задач:

- определения вертикальных усилий, которые необходимо передавать на опорное основание для ликвидации несоосности конусов, расположенных на верхней и нижней частях стыковочного устройства (определения части общего веса ВСП, которая поддерживается опорным основанием платформы при окончании стыковочной операции);
- расчета прочности конструкций стыковочных устройств и узлов крепления их к супермодулям.

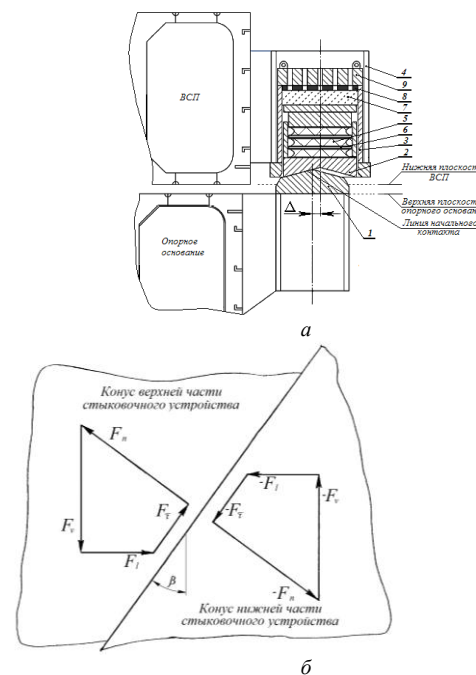


Рис. 1. Схемы конструкции стыкового устройства (а) и сил, действующих на его элементы (б): 1, 2 - силовые конусные элементы с начальной несоосностью  $\Delta$ ; 3 - направляющий цилиндр; 4 - цилиндрическая гильза; 5 - деформируемые элементы из эластомеров; 6 - промежуточные диски; 7 - прокладки из термопластичного полимерного материала; 8 - электронагревательный элемент; 9 - крышка с отверстиями.

Учитывая весьма малые размеры стыковочных устройств по сравнению с габаритами ВСП и опорного основания, для расчета необходимых

вертикальных усилий можно использовать расчетную модель напряженно-деформированного состояния опорного основания (без учета влияния на это состояние упругих деформаций ВСП). При этом принимаются во внимание силы веса ВСП, действующие на опорное основание, которые полагаются одинаковыми для всех шести точек контакта в зоне стыковочных устройств.

При наличии несоосности взаимодействие нижней и верхней частей стыковочных устройств, происходит по частям конических поверхностей верхней и нижней центрующих деталей. В начальной стадии стыковки контакт происходит не по поверхности, а по линии, являющейся образующей конуса. Будем полагать, что равнодействующая контактных усилий проходит через эту линию на протяжении всей операции стыковки. Схемы действия нагрузок на верхнюю и нижнюю части стыковочного устройства приведены на рис. 1б. Схема основана на предположении о том, что контактные усилия представляют собой нагрузку  $\vec{F}_n$ , действующую перпендикулярно к линии (поверхности) контакта, а также силу  $\vec{F}_\tau$ , направленную вдоль этой линии и существующую благодаря трению.

Эти силы уравниваются вертикальными и горизонтальными силами  $\vec{F}_v$  и  $\vec{F}_l$  ( $\vec{F}_v$  - это часть силы тяжести ВС, перенесенная (приходящаяся) на одно стыковочное устройство,  $\vec{F}_l$  - горизонтальная составляющая результирующей силы контактного взаимодействия).

В векторном виде условие равновесия отдельного конического элемента (верхнего или нижнего) стыковочного устройства имеет вид

$$\vec{F}_v + \vec{F}_l + \vec{F}_\tau + \vec{F}_n = 0.$$

Условия равновесия в скалярном виде (сумма проекций всех сил на горизонтальную и вертикальную оси равна нулю) можно записать в виде

$$\begin{aligned} F_n \cos \beta - F_l - F_\tau \sin \beta &= 0; \\ F_v &= F_n (\sin \beta + \mu \cos \beta), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\beta$  - угол между образующей конуса и вертикалью (рис. 1).

Решая эту систему алгебраических уравнений, получим следующие выражения для неизвестных величин сил  $F_n$  и  $F_\tau$

$$\begin{aligned} F_n &= F_v \sin \beta + F_l \cos \beta; \\ F_\tau &= F_v \cos \beta - F_l \sin \beta. \end{aligned}$$

Из этих формул следует, что в том случае, когда угол между равнодействующей сил  $F_n$  и  $F_\tau$  равен углу трения, т.е.  $F_\tau / F_n = \mu$  ( $\mu$  - коэффициент трения) боковая сила и вертикальная сила связаны следующей зависимостью

$$F_v / F_l = (\sin \beta + \mu \cos \beta) / (\cos \beta - \mu \sin \beta).$$

Таким образом, в условиях перехода от статического равновесия стыковочного устройства к движению его верхней части относительно нижней, т.е. в момент "страгивания" между всеми составляющими усилиями, действующих на это

устройство, существует определенное соотношение, зависящее от угла  $\beta$  и коэффициента трения  $f$ . Так, например, при  $\beta=30^\circ$ , соотношения вертикальных ( $F_v$ ) и боковых ( $F_l$ ) сил, действующих на стыковочное устройство, приведены на рис. 2.

Если условие статического равновесия (1) нарушается и выполняется соотношение

$$F_v / F_l > (\sin \beta + \mu \cos \beta) / (\cos \beta - \mu \sin \beta),$$

то происходит ускоренное движение ВСП относительно опорного основания. Поскольку отношение  $F_v / F_l$  существенно зависит от коэффициента трения, то и начало движения определяется коэффициентом трения. Так, например, при  $\beta=30^\circ$  и коэффициенте трения  $\mu = 0,3$  движение начинается, когда соотношение между силой, переданной на опорное основание и боковой силой, обусловленной упругим деформированием опорного основания, принимает вид  $F_v / F_l > 1,06$ , а при  $\mu = 0,1$  движение начинается, когда  $F_v / F_l > 0,72$ .

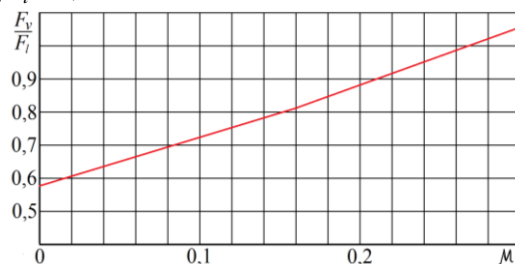


Рис. 2. Зависимость отношения вертикальной силы к боковой  $F_v / F_l$  от коэффициента трения при  $\beta=30^\circ$ .

Обычно при консервативном (осторожном) подходе к обеспечению операции стыковки и оценке необходимой балластировки судна и нижнего основания принимают значение коэффициента трения покоя равным 0,3, что обычно несколько превышает расчетную оценку коэффициента передачи веса (отношения вертикальной силы  $F_v$  к весу ВСП), необходимого для обеспечения принудительного совмещения стыкуемых поверхностей ВСП и опорного основания за счет упругого деформирования конструкций.

Вместе с тем при оценке прочности стыковочного устройства и конструкций, соединяющих его части с блоками платформы, необходимо принимать во внимание ситуации, при которых боковая сила принимает большие значения, т.е. возможность появления малых значений коэффициента трения  $f$ , при которых отношение  $F_v / F_l$  близко к 0,577.

### Особенности расчета напряженно-деформированного состояния блоков при их стыковке

Стыковка ВСП с опорным основанием обычно производится по одному (стационарные платформы) или нескольким (ППБУ) контурам, предназначенным для сварного соединения верхних

частей колонн опорного основания с силовыми связями верхнего строения. Эти контуры обычно расположены в весьма напряженных районах морских платформ, к качеству изготовления которых и работоспособности в эксплуатационных условиях предъявляются высокие требования. В соответствии с ними после завершения механической стыковки все связи ВСП должны соединяться высококачественной сваркой с соответствующими конструкциями опорного основания без отклонений от правильной геометрической формы. Такая операция возможна только в том случае, когда стыкуемые детали точно сопрягаются друг с другом, т.е. когда подвергаемые сварке контуры ВСП и опорного основания не имеют больших взаимных смещений.

Необходимая точность сопряжения достигается за счет применения стыковочных устройств, параметры которых существенно зависят от усилий, действующих на их контактных поверхностях. Для создания относительно компактных стыковочных устройств необходимо ограничивать отклонения совмещаемых и подвергаемых сварке контуров ВСП и опорного основания от их номинального положения. К важным мерам по такому ограничению относится расчетное прогнозирование деформаций корпусных конструкций на всех этапах транспортировки и стыковки модулей, о котором сказано выше. Такое прогнозирование должно дополняться технологическими мероприятиями, обеспечивающими минимальные взаимные отклонения сопрягаемых элементов ВСП и опорного основания. Эти отклонения должны устанавливаться с учетом следующих обстоятельств:

- все корпусные конструкции, изготавливаемые по традиционным технологиям, принятым в судостроении, имеют достаточно большие допуски на отклонения геометрических размеров и формы;
- при строительстве блоков поверхности стыковки ВСП и опорного блока изначально формируются как плоские, однако в дальнейшем (при отгрузке, транспортировке и выгрузке из СБТС) эти поверхности претерпевают деформирование и во время операции монтажа представляют собой, строго говоря, криволинейные поверхности; в наибольшей мере эта криволинейность характерна для поверхности стыковки ВСП, которое, как правило, в процессе монтажа значительно прогибается под действием собственного веса;
- в процессе дебалластировки опорного основания точки сопряжения, расположенные на его колоннах, изменяют свое положение относительно ВСП вследствие перераспределения сил веса и поддержки и в общем случае не совпадают с проектными координатами;
- качка судна с ВСП на волнении сопровождается периодическими смещениями совмещаемых точек ВСП и опорного основания друг относительно друга, что также приводит к осложнению стыковки, причем смещения могут увеличиваться при стыковке блоков ППБУ, при которой

имеет место и качка опорного основания, происходящая не синхронно с качкой ВСП.

При разработке проекта монтажа и конструировании стыковочных устройств обычно отсутствуют достоверные сведения о фактических взаимных смещениях совмещаемых контуров блоков конкретной платформы в момент начала стыковки. Поэтому эти смещения приближенно оценивают исходя из принятых норм контроля точности изготовления конструкций ВСП и опорного основания (контроля отклонений от номинального положения стыкуемых контуров). При оценке усилий в стыковочном устройстве и выборе его размеров расчетным путем оценивается возможность увеличения отклонений от номинальных размеров при отгрузке, транспортировке, выгрузке и подготовке к монтажу блоков, в результате чего устанавливаются расчетные (предельно допустимые) отклонения при монтаже. При проработке проектов морских операций обычно стремятся не допускать значительного роста полученных таким образом расчетных отклонений при монтаже по сравнению со значениями предельно допустимых отклонений от номинальных размеров, принятых на заводе-строителе.

Особую важность расчетное прогнозирование приобретает при стыковке блоков по нескольким контурам, реализуемой при монтаже ППБУ. В этом случае принудительное совмещение стыкуемых поверхностей ВСП и опорного основания за счет упругого деформирования конструкций приводит к появлению больших контактных усилий в стыковых устройствах. Оценка наибольших значений этих усилий производится на основе расчета значений сил, необходимых для совмещения отклоненных друг от друга стыкуемых контуров, осуществляемого благодаря деформациям колонн опорного основания (а также, в случае монтажа ППБУ, его понтонов), происходящих под действием сил веса ВСП, переносимого с СБТС на основание.

О важности решения поставленной задачи свидетельствует тот факт, что в соответствии с выполненным расчетом для компенсации взаимного смещения совмещаемых контуров одной из колонн ППБУ «Полярная звезда», характеризующего отклонением 25 мм в горизонтальном направлении, (остальные 5 сопрягаемых контуров считались состыкованными идеально, без отклонений) требовалось приложить огромное усилие, составлявшее 490 т. Отметим здесь, что фактические отклонение и усилие при монтаже платформы примерно втрое превышали приведенные здесь значения. Одной из причин такого расхождения является влияние усилий, приложенных к другим стыковочным узлам, на внутреннюю силу и упругие перемещения рассматриваемого устройства. При оценке взаимовлияния усилий, возникающих в стыковочных устройствах, необходимо учитывать их случайный характер.



**Вероятностный анализ усилий в стыковочных устройствах**

Для оценки усилий в стыковочных устройствах необходимо располагать сведениями о несовпадениях стыкуемых контуров ВСП и опорного основания. Такие несовпадения на каждом из контуров  $Z_i$  можно рассматривать как случайные величины, представляющие собой сумму других случайных величин

$$Z_i = X_i + Y,$$

где  $Y$  - смещение теоретического положения ВСП относительно теоретического положения основания (погрешность наведения блоков платформы);  $X_i$  - несовпадение контуров ВСП и опорного основания в горизонтальной плоскости, рассматриваемое как алгебраическая сумма допущенных при изготовлении блоков смещений реального контура ВСП относительно его теоретического положения  $X_i^{BCП}$  и соответствующего контура основания относительно его теоретического положения  $X_i^{очн}$ .

Случайная величина  $X_i$  (как и ее составляющие  $X_i^{BCП}$  и  $X_i^{очн}$ ) обычно считается подчиняющейся нормальному закону распределения. Ее математическое ожидание можно полагать равным нулю, а дисперсию  $D_X$  следует принимать с учетом точности изготовления конструкций, соответствующей технологии, принятой на заводах строителя блоков. Погрешность наведения блоков платформы  $Y$  также принимается подчиняющейся нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием. Ее дисперсия  $D_Y$  зависит от точности наведения, которая в свою очередь зависит от принятой при наведении измерительной системы и технологии позиционирования судна с грузом относительно колонн опорного основания.

Определяемые таким образом несовпадения контуров перед стыковкой  $Z_i$  представляют собой коррелированные нормальные случайные величины с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $D_Z$ , равной сумме дисперсий  $D_Y$  и  $D_X$ . Принимая во внимание некоррелированность случайных величин  $X_i$ , ковариацию случайных величин  $Z_i$  и  $Z_j$  следует считать равной  $D_Y$ .

При выполнении стыковочных операций горизонтальные упругие перемещения контуров, расположенных на верхних частях колонн опорного основания намного превышают горизонтальные упругие перемещения контуров ВСП. С учетом взаимовлияния упругих перемещений контуров, расположенных на колоннах опорного основания, при стыковке случайное горизонтальное усилие в

отдельном стыковочном устройстве, связанное линейной зависимостью со смещениями при стыковке  $Z_i$ , можно определить по формуле

$$F_i^l = \sum_{j=1}^n c_{ij} Z_j,$$

в которой  $c_{ij}$  - коэффициенты жесткости опорного основания, определяемые как горизонтальные упругие перемещения контура (стыковочного устройства)  $i$  при действии единичной горизонтальной силы на стыковочное устройство (контур)  $j$ , вычисленные при условии, что расчетная часть веса ВСП передана на опорное основание.

Заметим здесь, что случайные величины, получаемые при сложении гауссовских величин (также как и при любых линейных действиях над ними), являются снова гауссовскими случайными величинами. Принимая во внимание линейность связи между  $F_i^l$  и  $Z_j$ , дисперсию случайной силы  $F_i^l$  можно определить по формуле

$$D_i^F = \sum_{j=1}^n c_{ij}^2 K_j + 2 \sum_{k<j} c_{ik} c_{ij} K_{kj},$$

где  $K_{ij} = D_Z$  при  $i = j$  и  $K_{ij} = D_Y$  при  $i \neq j$ .

Учитывая постоянство дисперсий  $D_Y$  и  $D_Z$ , это выражение можно привести к виду

$$D_i^F = D_Z \sum_{j=1}^n c_{ij}^2 + 2D_Y \sum_{k<j} c_{ik} c_{ij}.$$

Максимальное значение силы  $F_i^l$  оценим по правилу "трех сигма":

$$F_i^{\max} = F_i^{cp} + 3\sqrt{D_i^F}, \tag{2}$$

где  $F_i^{cp}$  - среднее значение силы  $F_i^l$ , которое можно полагать равным нулю.

Теперь сделаем предположение, что положение всех стыковочных узлов (кроме одного, с номером  $i$ ) абсолютно точно совпадает с теоретическим (эксцентриситет стыковочных конических поверхностей, расположенных на нижней и верхней частях стыковочного устройства, равен нулю). Повторяя выкладки, аналогичные приведенным выше, в этом случае для оценки максимального значения силы можно записать следующее выражение

$$F_i^* = 3c_{ii}\sqrt{D_Z}. \tag{3}$$

С учетом последнего выражения, формулу (2) можно записать в виде

$$F_i^{\max} = k_F F_i^*, \tag{4}$$

где  $k_F = \sqrt{D_i^F / D_Z} / c_{ii}$ .

Вводя обозначения  $\bar{c}_{ij} = c_{ij} / c_{ii}$  и  $\bar{D}_Y = D_Y / D_Z$ , выражение для коэффициента  $k_F$  можно привести к виду

$$k_F = \sqrt{\sum_{j=1}^n \bar{c}_{ij}^2 + 2\bar{D}_Y \sum_{k<j} \bar{c}_{ik} \bar{c}_{ij}},$$

показывающему, что этот коэффициент зависит только от числа колонн опорного основания  $n$ , соотношений между коэффициентами жесткости  $c_{ij}$  и  $c_{ii}$ , а также между дисперсиями  $D_Y$  и  $D_Z$ .

При малых значениях  $\bar{c}_{ij}$  ( $i \neq j$ ), наблюдающихся при малой изгибной жесткости колонн опорного основания, значение  $k_F$  близко к единице. Расчетный анализ показывает, что при большой жесткости колонн и выполнении условия  $\bar{D}_Y \ll 1$  максимальные значения коэффициента  $k_F$  можно оценить по следующей приближенной формуле, полученной путем аппроксимации расчетных данных

$$k_F = 2(n-1)/n.$$

Эту формулу можно рекомендовать для упрощенной оценки коэффициента  $k_F$  с целью последующего выполнения расчета максимальной боковой силы по приближенным зависимостям (3) и (4). Заметим здесь, что оценке максимальных сил оценки в стыковочных узлах иногда целесообразно пользоваться не формулой (3), а определять их на основе детерминированного расчета. При его выполнении принимается предположение о том, что положение всех стыковочных узлов (кроме одного, с номером  $i$ ) абсолютно точно совпадает с теоретическим, а в узле  $i$  приложено усилие, способное деформировать опорное основание таким образом, чтобы вернуть рассматриваемый узел из максимально отклоненного положения, допускаемого установленными нормами дефектации при строительстве опорного основания в теоретическое положение. Обычно эта задача является линейной, поэтому она часто решается в несколько иной и по сути аналогичной постановке, при которой определяется наибольшая сила, необходимая для отклонения стыковочного узла из теоретического положения в некоторое крайнее положение, допустимое установленными технологическими нормами (рис. 3).

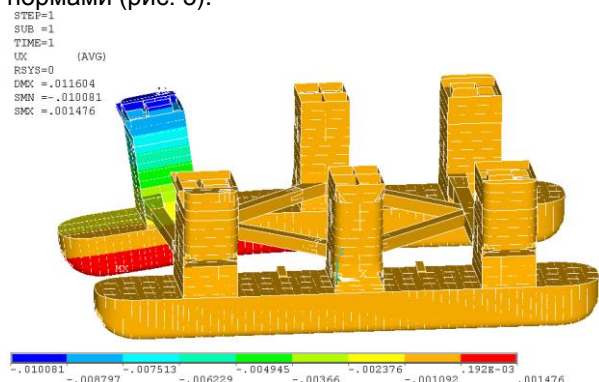


Рис.3. Распределение продольных перемещений  $U_x$  в колонне ППБУ при действии вдоль платформы горизонтальной нагрузки на одно из стыковочных устройств, расположенных в верхней части опорного основания платформы.

Выполненный таким образом вероятностный анализ сил в статической постановке является не вполне точным, так как при принудительном совмещении стыкуемых поверхностей ВСП и опорного основания за счет упругого деформирования конструкций возникают большие силы трения, которые могут изменяться скачкообразно во времени. Такая зависимость от времени приводит к появлению относительно небольших динамических эффектов при стыковке модулей морской платформы. Она объясняется тем, что коэффициент трения при движении верхней части стыковочного устройства относительно нижней зависит от относительной скорости, направленной вдоль образующих конических поверхностей, вступивших в контакт.

Коэффициент трения высок при очень низких относительных скоростях и примерно равен коэффициенту статического трения; в определенном диапазоне скоростей он снижается, а при высоких скоростях почти не зависит от скорости (динамическое трение). В результате наблюдается нелинейное поведение рассматриваемой механической системы, состоящей из стыкуемых модулей, динамические явления типа удара, а иногда и автоколебания фрикционной природы. Поэтому более достоверным является нелинейный конечно-элементный динамический расчет принудительно совмещаемых стыкуемых конструкций ВСП и опорного основания. При его выполнении коэффициент трения  $\mu$  на контактирующих поверхностях принимается зависящим от относительной скорости их перемещения  $V_r$ . Зависимость  $\mu(V_r)$  обычно представляется в упрощенном виде, изображенном на рис. 4.

При выполнении конечно-элементных расчетов такая зависимость аппроксимируется следующим образом

$$\mu = \mu_v [1 + (\mu_s / \mu_v - 1)] \exp(-d V_r),$$

где  $\mu_s$  - статический коэффициент трения (коэффициент трения покоя);  $\mu_v$  - динамический коэффициент трения (коэффициент трения скольжения);  $d$  - коэффициент затухания.

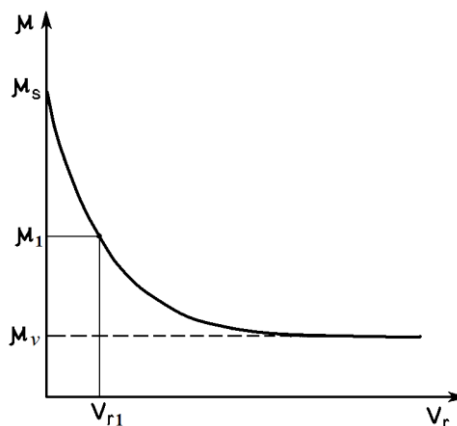


Рис. 4. Зависимость коэффициента  $\mu$  от относительной скорости контактирующих поверхностей  $V_r$ .

Коэффициент затухания  $d$  обычно определяется по одной из точек зависимости  $\mu(V_r)$ , например, точке  $(V_{r1}, \mu_1)$ , выбранной таким образом, что  $\mu_s > \mu_1 > \mu_v$  (рис. 4):

$$d = -\ln((\mu_1 - \mu_v) / [\mu_v(\mu_s / \mu_v - 1)]) / V_{r1}.$$

Альтернативный подход к вычислению коэффициента трения  $\mu$ , рекомендуемый при больших неравномерно распределенных давлениях на стальных контактирующих поверхностях [3], состоит в использовании следующей зависимости  $\mu(V_r)$ :

$$\mu = \begin{cases} 0,3, & \text{при } V_r < 0,03 \text{ см/с,} \\ 0,200 - 0,0654 \log V_r & \text{при } 0,03 \leq V_r < 10 \text{ см/с,} \\ 0,135, & \text{при } V_r \geq 10 \text{ см/с.} \end{cases}$$

В соответствии с этой зависимостью  $\mu_s = 0,3$  и  $\mu_v = 0,135$ .

Расчетные исследования с использованием этой зависимости показывают, что при медленной и плавной передаче веса верхнего строения на опорное основание возможно как равномерное (плавное) изменение относительных перемещений нижней и верхней частей стыковочного устройства после их вступления в контактное взаимодействие, так и неравномерное (неустойчивое).

При проектировании стыковочных устройств желательно выбирать угол между образующей конуса и вертикалью  $\beta$  таким, чтобы выполнялось следующее приближенное соотношение

$$F_v \cos \beta - F_l \sin \beta \approx \mu_s (F_v \sin \beta + F_l \cos \beta), \quad (5)$$

т.е. чтобы суммарная активная сила, стремящаяся сдвинуть конуса друг относительно друга, мало отличалась от силы трения покоя.

При нарушении этого соотношения и выполнении неравенства

$$F_v \cos \beta - F_l \sin \beta \leq \mu (F_v \sin \beta + F_l \cos \beta) \quad (6)$$

имеет место неравномерность перемещений, выражающаяся иногда в полной остановке движения ВСП относительно опорного основания. При такой остановке коэффициент трения  $\mu$  возрастает до своего максимального значения  $\mu_s$ . Последующее увеличение вертикальной силы  $F_v$ , обусловленное течением процесса передачи веса ВСП на основание, сопровождается сильным сжатием упругих элементов стыковочного устройства ростом силы реакции  $F_n$ . При этом силы трения на конических поверхностях  $F_{mp} = \mu_s F_n$  растут, а боковая сила  $F_l$  при этом сохраняет постоянное значение. Такой процесс статического изменения сил происходит до тех пор, пока выполняется неравенство (6).

При его нарушении, возможном при дальнейшей передаче веса ВСП на основание, начинается ускоренное движение ВСП относительно основания, сопровождающееся линейным ростом боковой силы  $F_l$  при вертикальном перемещении ВСП и резким уменьшением коэффици-

ента и силы трения, а также появлением сил инерции движущихся масс. Быстрый рост боковой силы при вертикальном перемещении ВСП приводит к снижению эксцентриситета верхнего и нижнего конусов стыкового устройства, увеличению силы трения и снижению активной силы, вызывающей движение. В результате движение сильно замедляется, коэффициент трения увеличивается и становится равным коэффициенту трения покоя. В итоге движение останавливается. Фиксируемые при этом вертикальные ускорения ВСП и опорного основания, как правило, малы, а наблюдающиеся динамические эффекты не значительны.

Описанный выше характер движения стыкуемых частей платформы наблюдался при монтаже ППБУ. Например, при монтаже наплавным способом платформы "Полярная звезда" производилась очень медленная передача сил веса верхнего строения с СБТС на опорное основание. При этом на начальной стадии процесса происходило медленное и плавное движение ВСП относительно опорного основания, в результате которого эксцентриситет конических поверхностей верхней и нижней частей одного из стыковочных устройств плавно уменьшился от 75 мм до 35 мм. В дальнейшем движение ВСП вниз остановилось, а затем, при существенном увеличении передачи веса, наступила завершающая стадия принудительного совмещения одного из стыкуемых контуров. На этой стадии зафиксировано быстрое (практически скачкообразное) изменение эксцентриситета конических поверхностей верхней и нижней частей стыковочного устройства (от 35 мм до нулевого значения). Наблюдавшиеся при этом динамические эффекты не сопровождались значительным увеличением усилий в стыковочных устройствах и напряжений в конструкциях по сравнению со статическими значениями.

### Заключение

В результате выполненных исследований:

- разработан вероятностный метод оценки усилий в стыковочном устройстве, используемом для принудительного совмещения стыкуемых кромок ВСП и опорного основания при монтаже ППБУ в морских условиях наплавным способом с деформированием конструкций соединяемых блоков;
- разработан метод расчета напряженного состояния конструкций ППБУ, обусловленного проведением монтажа ППБУ наплавным способом;
- проанализированы особенности процесса стыковки, возможность его неустойчивого развития и установлены условия, при которых возможно скачкообразное изменение эксцентриситета конических поверхностей верхней и нижней частей стыковочного устройства при монтаже ППБУ в морских условиях.

На основе разработанных методов можно определить вертикальные усилия, представляющие собой часть веса ВСП, которые необходимо передавать на опорное основание для ликвидации несоосности конусов, расположенных на верхней и нижней частях стыковочного устройства, а также выполнить расчет прочности конструкций стыковочных устройств и узлов крепле-

ния их к соединяемым блокам. В результате можно обеспечить надежность и безопасность проведения морского монтажа ППБУ за счет выполнения направленных на это расчетов стыковочных устройств и конструкций ВСП и опорного основания в процессе разработки проекта морской транспортно-монтажной операции.

### Литература

1. 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).
2. Караев Р.Н. Морские сооружения для бурения и эксплуатации нефтегазовых скважин. – СПб.: Издательство СПбГМТУ, 2014, 388 с.
3. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968, 480 с.

### References

1. Alferov V.I., Kryzhevich G.B., Podgorniy L.N., Popov N.G., Shaposhnikov V.M. Opyt razrabotki proekta morskoy perevozki supermodulej PPBU “Poljarnaja zvezda” i tehnologii ih sborki v morskikh uslovijah. – Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra, 2011, vyp. 65 (349).
2. Karaev R.N. Morskie sooruzhenija dlja burenija i jekspluatcii neftegazovyh skvazhin. – SPb.: Izdatel'stvo SPbGMTU, 2014, 388 s.
3. Kragel'skij I.V. Trenie i iznos. – M.: Mashinostroenie, 1968, 480 s.

УДК 699.841

## СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕМПФЕРА С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

**Островская Надежда Владимировна**

кандидат технических наук,  
старший преподаватель кафедры теоретической механики и сопротивления материалов  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
тел. (911) 835-55-52; e-mail: ostrovskaya.nv@yandex.ru

**Рутман Юрий Лазаревич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механики  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет  
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4  
605fractal@mail.ru

**Грунин Владислав Викторович**

ведущий инженер  
ОАО «Конструкторское бюро Специального машиностроения»  
192012, Санкт-Петербург, пр. Обуховской обороны, д. 120, лит.  
vladg999@mail.ru

Эффективной защитой сооружений, их технологического оборудования, трубопроводов и других конструкций от экстремальных механических нагрузок (землетрясения, ударные волны, взрывы, гидравлические удары и т.п.) являются пластические демпферы.

В статье приведены результаты испытаний экспериментального образца пластического демпфера и выполнено сравнение этих результатов с компьютерным расчетом в пакете «ANSYS». В качестве опытного образца выступил упруго-пластический амортизатор с пластически деформируемыми элементами прямоугольного сечения из листовой стали. В статье содержатся объем и порядок проведения натурных испытаний опытного образца с помощью пресса П-500, а также конечно-элементный расчет силовых характеристик рассматриваемой конструкции пластического демпфера.

В статье демонстрируется возможность замены длительного дорогостоящего процесса экспериментальной отработки пластических демпферов компьютерными расчетами.

**Ключевые слова:** пластические демпферы, силовая характеристика, конечно-элементный анализ, экспериментальная проверка, испытания на растяжение/сжатие.

## COMPARISON OF FINAL-ELEMENT CALCULATION RESULTS OF THE PLASTIC DAMPER CHARACTERISTICS TO THE EXPERIMENT

**Ostrovskaya Nadejda Vladimirovna**

PhD, the major teacher of department of theoretical mechanics and strength of material  
Saint-Petersburg State Marine Technical University  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190008, Russian Federation  
e-mail: ostrovskaya.nv@yandex.ru

**Rutman Yuriy Lazarevich**

Dr.Sci.Tech., the professor of department of mechanics,  
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

**Grunin Vladislav Viktorovich**

leading engineer  
JSC Design Bureau of Special Mechanical Engineering

Plastic dampers are effective protection of constructions, their processing equipment, pipelines and other designs against extreme mechanical loadings (an earthquake, shock waves, explosions, water hammers, etc.).

An experimental tests results of a plastic damper sample are given in article and comparison of these results with computer calculation with ANSYS is executed. The elasto-plastic shock-absorber with plastically deformable elements of rectangular section from sheet steel has acted as a prototype.

Article contains the volume and an order of carrying out natural tests of a prototype by means of P-500 press, and also final-element calculation of power characteristics of the considered design.

In article the possibility of replacement by computer calculations of a plastic dampers experimental working off long expensive process is shown.

**Keywords:** spatial plastic dampers, power characteristic, final-element analysis, experimental check, tests on stretch, ing compression.

## Введение

Эффективной защитой сооружений, их технологического оборудования, трубопроводов и других конструкций от экстремальных механических нагрузок (землетрясения, ударные волны, взрывы, гидравлические удары и т.п.) являются пластические демпферы.

Принцип их действия основан на пластической деформации специальных металлических элементов. Два фактора определяют эффективность работы таких устройств:

- высокий уровень диссипации механической энергии;
- незначительное изменение в процессе деформирования пластических элементов их реактивных усилий.

Применение в демпферах пластически деформируемых элементов специальной конфигурации позволило создать простые по конструкции, удобные и надежные в эксплуатации демпферы, создающие пространственную защиту [1-3]. Эти демпферы можно назвать пластическими демпферами – ПД. Конструкции ПД создаются как пространственная комбинация стержней и пластин, изготовленных из пластических сталей. Характерным примером ПД является демпфер, для которого вертикальное и горизонтальное движение защищаемого объекта, крепящегося к фланцу 1, относительно основания 3, обеспечивается изгибом и кручением стержней 2 (рис. 1).

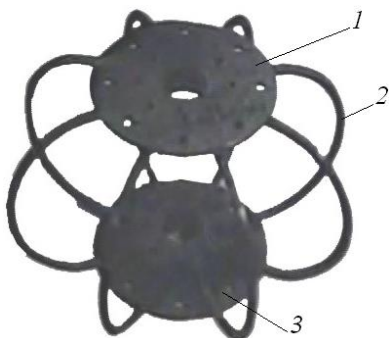


Рис. 1. Пространственный пластический демпфер с криволинейно-стержневыми элементами, разработанный ОАО «КБСМ»

В качестве пластически деформируемых элементов также применяют элементы прямоугольного сечения из листовой стали.

ПД часто применяются в комбинации с упругими элементами. Так, например, в сейсмоизоляторе японской фирмы «Sumitomo Metal Mining» параллельно работают резинометаллический

упругий элемент и пластические демпферы из изогнутых металлических листов [4] (рис. 2).

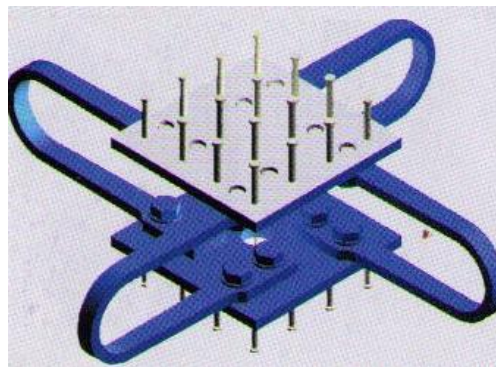


Рис. 2. Пластические демпферы японской фирмы «Sumitomo Metal Mining»

При динамических воздействиях элементы ПД подвергаются сложному (не пропорциональному по отдельным компонентам) пластическому деформированию.

Простые расчетные схемы не позволяют проанализировать эти процессы. Чтобы правильно выбрать параметры ПД приходится проводить серию экспериментов на опытных образцах. Такая отработка ПД трудоемка, требует больших затрат времени и средств.

Задачей данной статьи является демонстрация возможности замены длительного дорогостоящего процесса экспериментальной отработки ПД компьютерными расчетами.

В статье приведены результаты испытаний экспериментального образца ПД и выполнено сравнение этих результатов с компьютерным расчетом в пакете «ANSYS».

## 1. Испытания ПД

Испытания ПД проводились ОАО «КБСМ», которое было разработчиком ПД данного типа [5-7]. При испытаниях выполнялось сжатие и растяжение ПД вдоль вертикальной оси с помощью прессы П-500. Объем и порядок проведения испытаний показан в таблице 1. Программа была составлена таким образом, чтобы проверить ПД в условиях циклического нагружения и довести его до разрушения.

Для равномерного распределения нагрузки, передаваемой от прессы к ПД, был изготовлен деформируемый мерный элемент (ДМЭ), который представляет собой стальной полый цилиндр с наклеенными на его наружную поверхность тензодатчиками, расположенными в двух диаметральных взаимно перпендикулярных плоскостях. Суммарная величина растяжения ПД от деформированного положения была **87 мм**, при этом

ПД вернулось в первоначальное положение. Затем было произведено растяжение ПД от нулевого положения. При проведении этого испытания произошло разрушение одного из рабочих элементов (амортизирующих лент) ПД в зоне сварного шва.

При испытании ПД на сжатие на ход около **93 мм** максимальное усилие составило **32 т**. При возврате ПД в исходное положение максимальное усилие составило **34 т**. Установка ПД на пресс в исходном положении и после сжатия показана на рис. 3.

По результатам испытаний была получена суммарная кривая зависимости усилия от вертикального перемещения для четырех опытов (рис. 4), которая зависит не только от силовой характеристики собственно ПД, но и от податливости стенда. Практически податливость стенда проявляется только на начальном участке наклона, соответствующего упругому расчету ПД, то силовая характеристика в первом полуцикле нагружения будет иметь вид, представленный на рис. 6.

Таблица 1 – Объем испытаний и порядок проведения испытаний ПД

№ этапа	Действие	Ход, мм
Опыт 1	Сжатие / Снятие нагрузки	65
Опыт 2	Сжатие / Снятие нагрузки	46
Опыт 3	Растяжение / Снятие нагрузки	65 <i>(от деформированного состояния)</i>
Опыт 4	Растяжение / Снятие нагрузки	40
Опыт 5	Растяжение	до разрушения



Рис. 3. Установка ПД на пресс в исходное положение, и после сжатия

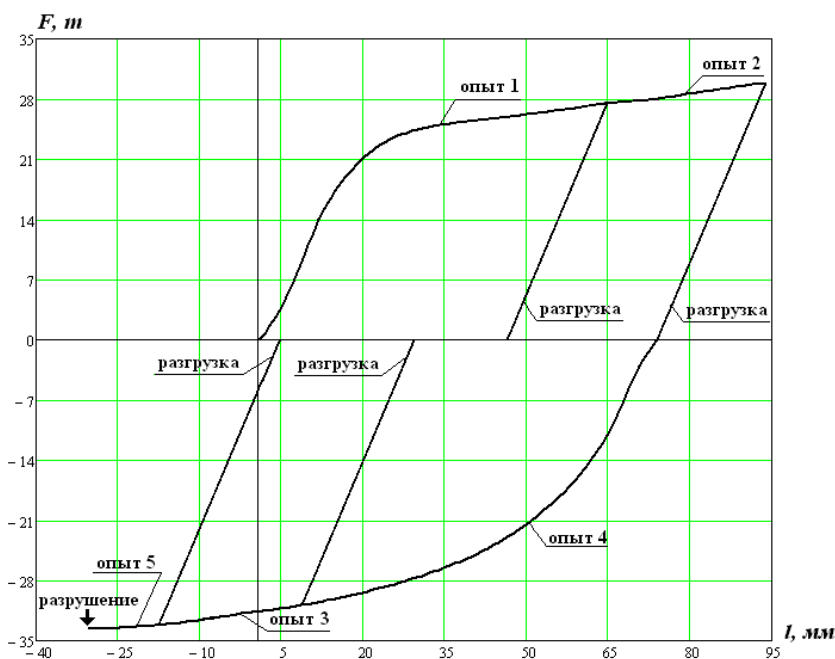


Рис. 4. Суммарная кривая зависимости усилия от вертикального перемещения для четырех опытов

## 2. Испытания образца материала ПД

После завершения работ на гидравлическом прессе П-500 было принято решение об испытаниях образца-свидетеля материала ПД для определения диаграммы материала «деформация–напряжение».

На рис. 5 показан образец, изготовленный в соответствии с рекомендациями ГОСТ 1497-84, для определения равномерного относительного удлинения  $\delta_p$ . Расчетная длина образца равномерно разделена рисками на участки длиной **5 мм**.

При нагружении образца регистрировалась диаграмма деформирования « $P-\Delta l$ ». Нагружение образца производилось в два этапа. На первом этапе – до максимальной силы  $P_{max} = 37 \text{ кН}$ .

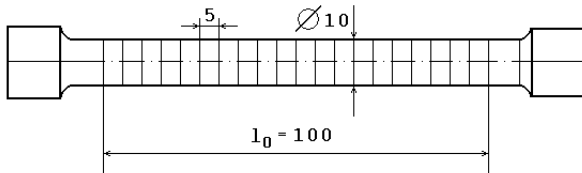


Рис. 5. Образец для определения равномерного относительного удлинения  $\delta_p$

После чего наступило существенное уменьшение силы, обусловленное началом формирования шейки.

Измерение образца показали, что его диаметр слева и справа от участка с шейкой уменьшился до  $\varnothing 9.5 \text{ мм}$ , а участок с шейкой располагается близко к середине на длине участка с четырьмя разметочными рисками. Диаметр шейки  $\varnothing 6.3 \text{ мм}$ .

На втором этапе было произведено нагружение образца до разрушения. Усилие разрушения равно  $P_p = 28 \text{ кН}$ .

На диаграмме деформирования образца зарегистрированное удлинение на линейном участке на порядок больше расчетного упругого удлинения образца. Это объясняется упругими свойствами разрывной машины. Для построения диаграммы материала « $\sigma-\varepsilon$ » была исключена податливость разрывной машины. Диаграмма построена до величины предела временного сопротивления (рис. 6).

Для определения равномерной относительной деформации материала в расчет принимались равномерно растянутые участки образца-свидетеля. Исходная суммарная их длина равна:

$$l_p = (7 + 8) \cdot 5 = 75 \text{ мм}, \quad (1)$$

где 5 мм – первоначальная длина участков.

Суммарная длина этих участков после деформирования образца равна  $l_d = 85.7 \text{ мм}$ .

Равномерное относительное удлинение определяется по формуле:

$$\delta_p = \frac{l_d - l_p}{l_p} \cdot 100\% = \frac{85.7 - 75.0}{75.0} \cdot 100\% = 13\%. \quad (2)$$

Числовое значение напряжения временного сопротивления определено по формуле:

$$\sigma_{\varepsilon} = \frac{P_{\varepsilon}}{F} = \frac{4 \cdot P_{\varepsilon}}{\pi \cdot d^2} = 470 \text{ МПа}, \quad (3)$$

где  $P_{\varepsilon} = 37 \text{ кН}$  – усилие, соответствующее пределу временного сопротивления;  $d = 10 \text{ мм}$  – исходный диаметр образца-свидетеля.

Таким образом, основные механические характеристики материала рабочего элемента (амортизирующей ленты) ПД имеют следующие значения:  $\sigma_{\varepsilon} = 470 \text{ МПа}$ ;  $\varepsilon_{\varepsilon} = 13\%$ .

Предел текучести принят:  $\sigma_T = 250 \text{ МПа}$ .

Параметры этой диаграммы являются исходными данными для проведения конечно-элементного расчета.

## 3. Конечно-элементный расчет ПД

Для установления точности методик расчета конструкции ПД был проведен его конечно-элементный анализ с помощью компьютерного пакета «ANSYS».

На рис. 7 представлена одна четвертая пространственной конечно-элементной модели конструкции ПД, которая состоит из 8-узловых элементов «SOLID 185» и обладает двумя плоскостями симметрии, а также модель ПД после статического деформирования.

В качестве исходных данных для расчета была взята кусочно-линейная аппроксимация диаграммы, приведенной на рис. 6. Основные механические характеристики приняты:  $\sigma_{\varepsilon} = 470 \text{ МПа}$ ;  $\varepsilon_{\varepsilon} = 13\%$ ,  $\sigma_T = 250 \text{ МПа}$

Определенная по вышеописанной модели и указанным исходным данным силовая характеристика ПД при нагружении без разгрузки показана на рис. 6. Максимальные деформации в заделке ленты, соответствующие перемещению **80 мм**, равны 9 %.

Расчет количества циклов нагружения ПД производился по формуле Коффина-Менсона для металлов [8]. В рассматриваемом эксперименте:

$$N_p = \frac{1}{2} \left( \frac{\varepsilon_{\varepsilon}}{\Delta \varepsilon_p} \right)^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{0.13}{0.09} \right)^2 = 1, \quad (4)$$

где  $N_p$  – число циклов до разрушения;  $\varepsilon_{\varepsilon}$  – деформация, соответствующая пределу временного сопротивления;  $\Delta \varepsilon_p$  – односторонняя пластическая деформация за цикл (размах петли гистерезиса).

В эксперименте ПД выдержал 1 цикл срабатывания до разрушения при максимальной амплитуде перемещения **80 мм**.

Таким образом, расчет цикличности также дает хорошее совпадение с экспериментом.



Увеличение циклической работоспособности можно достичь конструктивно или сменой материала. Например, применяя в ПД нержавеющую сталь 01Х18Н9Т, получим (при перемещении по вертикали **80 мм**) число циклов срабатывания 10.

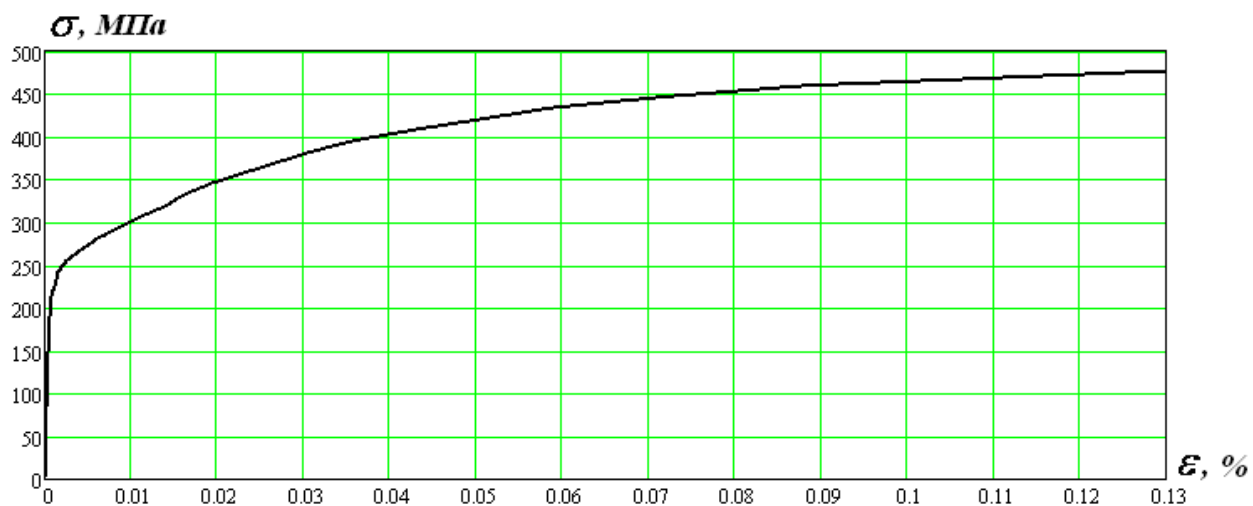


Рис. 6. Диаграмма материала

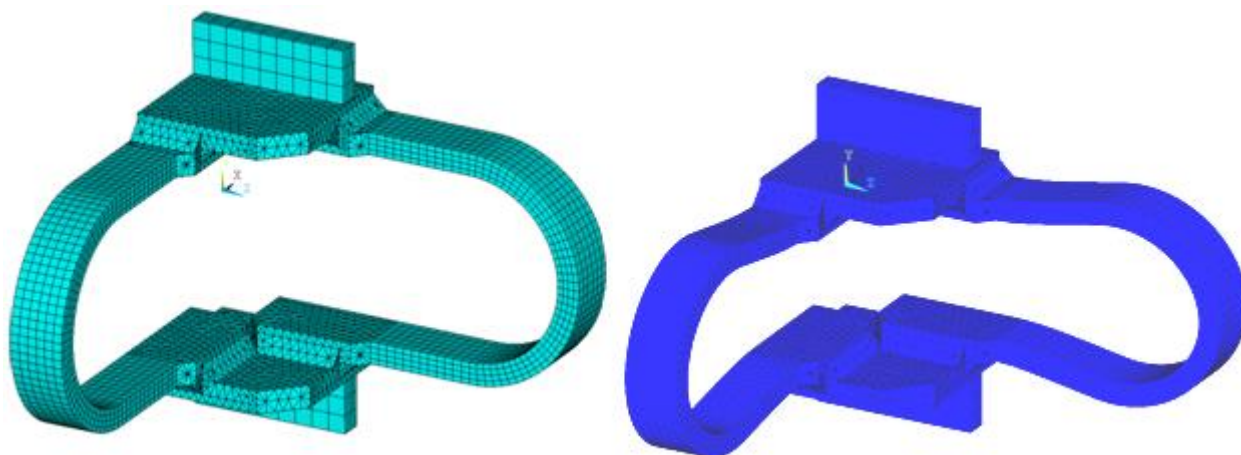


Рис. 7. Конечно-элементная модель конструкции ПД до и после деформирования

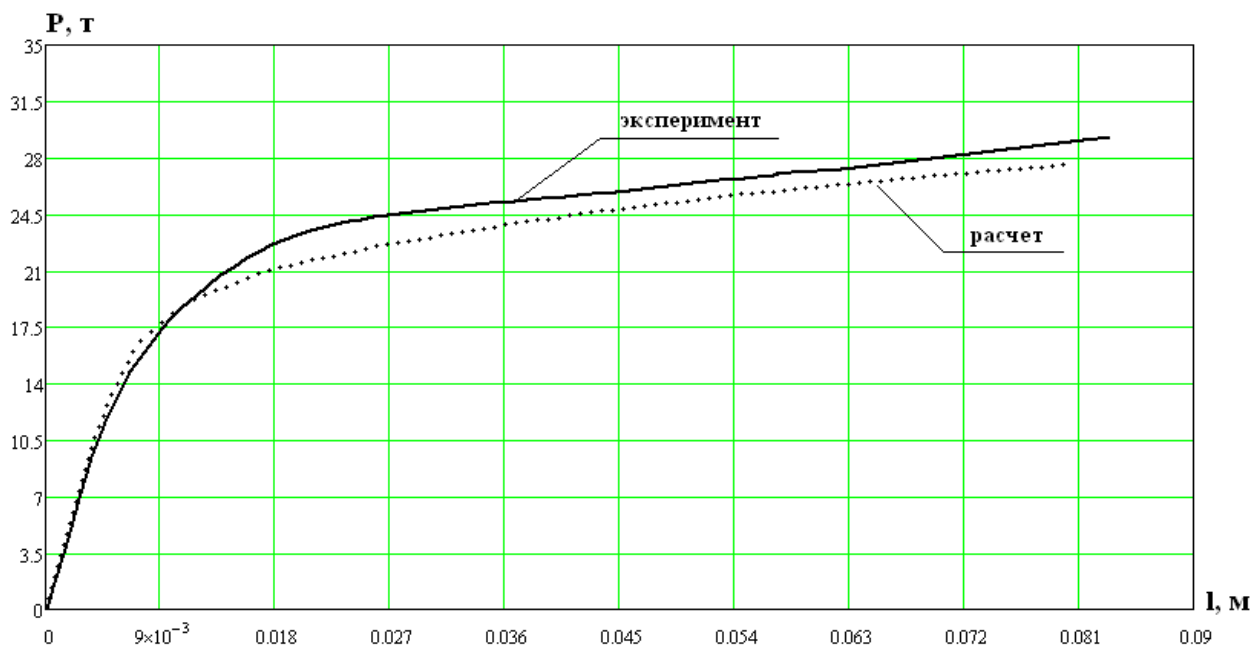


Рис. 8. Сравнение силовых характеристик, полученных в результате эксперимента и расчета

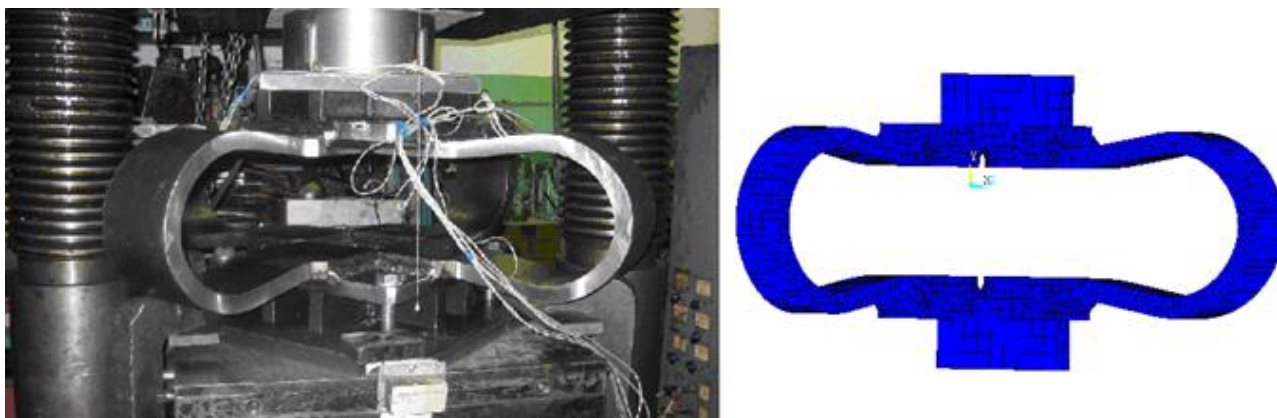


Рис. 9. Сравнения характера деформирования ПД в эксперименте и конечно-элементном расчете

### Заключение

1. Конечно-элементный расчет силовой характеристики ПД дает результаты, отличающиеся от экспериментальных данных не более чем на 5 %, а также характер деформирования ПД для дан-

ной методики расчета совпадает к экспериментальным.

2. Продемонстрирована возможность замены экспериментальной отработки ПД компьютерными расчетами.

### Литература

1. Rutman, Y.L. Device for Protection of Buildings, Equipment and Tubings // J. Const. Steel Res. – 1998. – Vol. 46(1-3). – P. 359-361.
2. Беляев В.С., Гуськов В.Д., Долбенков В.Г., Рутман Ю.Л. Устройства для сейсмоизоляции зданий, промышленных объектов и их оборудования // Вестник ИНЖЭКОНа. Серия: технические науки. 2007. № 6(19). С. 114-121.

3. Belyaev V., Guskov V., Routman Y. NPP seismic protection against shok and vibration loads // Proceedings of the 20nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. – 2009. – Reference paper: 2479.

4. Островская, Н.В. Анализ основных подходов к проектированию параметров пластического демпфирования в системах сейсмоизоляции // Морские интеллектуальные технологии. – 2014.– №3(24). – С. 61-66.

5. Belyaev V., Kovaleva N., Routman Y. Studying support-pendulum seismic isolation system for large NPP equipment // Proceedings of the 22nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. – 2013. – Reference paper: 423.

6. Рутман, Ю.Л. Маятниковые сейсмоизолирующие опоры. Конструкция. Расчет. Эксперимент // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 1(27). – С. 37-43.

7. Островская Н.В. Экспериментальное исследование эффективности пластического демпфирования в системе сейсмоизоляции маятникового типа // Труды СПбГМТУ. – Вып. 4(267). – 2016. – С. 59 – 63.

8. Писаренко Г.С., Можаровский Н.С. – Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. Справочное пособие. – Киев: Наукова Думка, 1981 – 496 с.

### References

1. Rutman, Y.L. Device for Protection of Buildings, Equipment and Tubings // J. Const. Steel Res. – 1998. – Vol. 46(1-3). – P. 359-361.

2. Beljaev V.S., Gus'kov V.D., Dolbenkov V.G., Rutman Ju.L (2007) Devices for a seymsoizolyation of buildings, industrial facilities and their equipment, Bulletin INZhJeKONA, № 6(19), 114-121.

3. Belyaev V., Guskov V., Routman Y. (2009) NPP seismic protection against shok and vibration loads // Proceedings of the 20nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Reference paper: 2479.

4. Ostrovskaia, N.V. (2014) The analysis of the basically ways to design plastic damping parameters in seismoisolation systems, MORINTEX, №3(24), 61-66.

5. Belyaev V., Kovaleva N., Routman Y. (2013) Studying support-pendulum seismic isolation system for large NPP equipment, Proceedings of the 22nd Conference on SMiRT, Reference paper: 423.

6. Rutman, Ju.L. (2012) The pendular seismoisolating support. Design. Calculation. Experiment, Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal, № 1(27), 37-43.

7. Ostrovskaia N.V. (2016) The experimental study of plastic damping efficiency in seismoisolation system of pendulum type, Trudy SPGMTU. – Vyp. 4(267). – 2016. – S. 59 – 63.

8. Pisarenko G.S., Mozharovskij N.S. (1981) Equations and regional tasks of the theory of plasticity and creep. Handbook, Kiev: Naukova Dumka, 496 p.

*УДК 629.12.001.2*

УДК 629.12.001.2

## МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО И КОНСТРУКТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ / РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСА КОРАБЛЕЙ И СУДОВ

**Тряскин Владимир Николаевич**

д.т.н., профессор, профессор кафедры конструкции и технической эксплуатации судов  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru

**Рюмин Сергей Николаевич**

к.т.н. декан факультета кораблестроения и океанотехники  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: kpsrumin@gmail.com

**Дехтярь Ирина Владимировна**

аспирант кафедры конструкции и технической эксплуатации судов  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: irina.dekhtyar@yandex.ru

### Аннотация

В настоящей статье рассмотрены методы и алгоритмы геометрического и конструктивного моделирования конструкций корпуса кораблей и судов для решения задач проектирования и расчета прочности корпусных конструкций. Для выполнения таких расчетов необходим большой объем информации - данные по форме корпуса, форме внутренних структур, положению листов и балок. Электронную модель корпуса корабля предложено формировать при помощи специальных методик, реализованных в программном обеспечении. Предложены типовые схемы второго дна, второго борта и верхней палубы. Рассмотрены особенности решения задачи трассировки балок набора и автоматизированного построения растяжки наружной обшивки. Описан алгоритм геометрического и конструктивного моделирования корпуса корабля и его структурных составляющих. Приведены фрагменты текстовых файлов, описывающих форму корпуса и внутренних структур. Представлено описание модулей программного комплекса, применение которого существенно снижает трудоемкость разработки новых проектов кораблей или оценки технического состояния корпусных конструкций.

**Ключевые слова:** база данных по корпусу, геометрическая модель, конструкция корпуса корабля, САПР, программное обеспечение, расчёт прочности, трехмерная модель корпуса корабля, электронная модель

## METHODS AND ALGORITHMS OF GEOMETRICAL AND STRUCTURAL MODELING IN THE HULL STRUCTURES DESIGN / STRENGTH CALCULATION OF THE SHIPS AND VESSELS

**Tryaskin Vladimir Nikolaevich**

Dr. Sci. Tech., the professor, the professor of DEPARTMENT OF SHIP CONSTRUCTION AND TECHNICAL OPERATION,

STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT- PETERSBURG

Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru

**Ryumin Sergey Nikolaevich**

Ph.D., the dean of FACULTY OF SHIPBUILDING AND OCEAN ENGINEERING,  
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT- PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: rumin@gmx.net

**Dekhtyar Irina Vladimirovna**

postgraduate student, DEPARTMENT OF SHIP CONSTRUCTION AND TECHNICAL OPERATION,  
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT- PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: irina.dekhtyar@yandex.ru

### Abstract

The article deals with methods and algorithms of ship hull geometrical and structural modeling for designing and strength calculation of ship structures. Large data base is needed for making such calculations. It should consist of information about hull body shape, internal structures shape and position of plates, beams and other structure members. Special methods of ship hull model creating which are realized in CAD system are offered in this paper. Typical schemes of inner bottom, inner hull and upper deck modeling are considered. Features of stiffeners tracing and ship-aided creating of shell expansion are shown. Algorithm of geometrical and structural modeling of ship hull and its program realization is described. Examples of text files that contain information about hull body and inner structures shape are given in the article. Software considered in the text can simplify the process of design and condition assessment of ship structures. Screenshots, illustrating interface and principles of working for developed program are shown.

**Key words:** data base of ship hull, geometrical model, ship hull structures, CAD system, software, strength calculation, three-dimensional model of ship hull, electronic model

### Введение

Задачи геометрического и конструктивного моделирования решаются при параметрическом проектировании, при выполнении проверочных расчетов прочности конструкций корпуса кораблей и судов. Под геометрическим моделированием будем понимать формирование геометрических моделей, которые описывают форму и размеры корпуса судна или его структурных составляющих (второго дна, палуб, переборок и т.д.) [1]. Под конструктивным моделированием в данной работе будем понимать формирование модели, которая определяет декомпозицию корпуса судна на структурные составляющие, однозначно задает пространственное и взаимное расположение этих структурных составляющих, а также их элементов (листов, балок набора и т.д.) [1].

Методология геометрического и конструктивного моделирования корпуса судна и его структурных составляющих была разработана на кафедре конструкции и технической эксплуатации судов СПбГМТУ в процессе разработки алгоритмов и программного обеспечения автоматизированных систем, которые применяются на кафедре для решения различных задач: оценки технического состояния корпуса эксплуатирующихся судов, кораблей, плавучих доков; параметриче-

ского проектирования конструкций корпуса новых судов, кораблей, плавучих доков в рамках эскизного и технического проектов; выполнения проверочных расчетов конструкций уже разработанных проектов. Заказчиками таких работ являются судостроительные компании, проектные бюро, Российский морской Регистр судоходства.

Для решения таких задач необходим большой объем исходной информации, в который обязательно должны быть включены данные по форме корпуса, форме внутренних конструкций, информация о линиях сопряжения смежных структур, а также о расположении листов и балок набора в составе структур.

Как правило, большинство данных необходимо либо перенести с чертежей (выполненных на бумаге) в требуемую электронную форму, либо создать заново, так как по множеству эксплуатируемых судов, кораблей отсутствует требуемая проектная информация. К примеру, не всегда в документации присутствует теоретический чертеж. Для формирования геометрической модели корпуса в таких условиях применяются специальные методики, реализованные в программном обеспечении.

## 1. Состав геометрической модели корпуса

Для решения задач проектирования / расчета прочности корпусных конструкций должна быть задана форма корпуса, установлено расположение палуб и продольных переборок; сделана разбивка конструкций на листы, определено положение балок основного и рамного набора.

Для ограничения объема информации, с которым конструктору необходимо работать одновременно, корпус корабля разбивается на районы. В качестве такого района может быть принята часть корпуса, ограниченная соседними поперечными переборками - "конструктивный отсек".

В пределах конструктивного отсека корпус разбивается на подструктуры: днище, борт, второе дно, продольный междудонный набор (вертикальный киль, днищевые стрингеры – каждый стрингер считается отдельной подструктурой), продольные переборки, палубы и т.д.

При разбивке на подструктуры необходимо учитывать систему набора. Предпочтительным является вариант, когда конструкции с различными системами набора относятся к разным участкам.

В каждой подструктуре затем выделяются листы, балки основного набора или ребра жесткости (при их наличии) и рамные балки.

## 2. Опорная геометрическая модель корпуса корабля

Для решения рассматриваемых задач достаточно иметь электронную модель наружных обводов корпуса, выполненную в каркасной форме. Для её построения применяется несколько методов, выбор конкретного из них зависит от состава исходной информации о форме корпуса.

Электронная каркасная модель обводов корпуса корабля размещается в файле, содержащем значения, определяющие положение и форму шпангоутных сечений которому присвоено расширение \*.S2G (рис. 1).

Каждая строка этого файла начинается с кода, по которому определяется содержимое текущей строки. Код &N указывает на уникальный номер шпангоутного сечения. Строка с указанным кодом открывает блок информации для текущего шпангоутного сечения. В строку, начинающуюся с кода &X, записывается значение абсциссы шпангоутного сечения относительно миделя в метрах. В строке с кодом &DN записывается порядковый номер точки, фиксирующей точку пересечения линии борта и линии палубы.

```

&N 0
&X -57.5
&DN 3
&YZ 0.0000 0.0000
&YZ 7.1000 0.0000
&YZ 7.1000 9.8400
&YZ 0.0000 9.8400
&N 1
&X -28.75
&DN 3
&YZ 0.0000 0.0000
&YZ 7.1000 0.0000
&YZ 7.1000 9.8400
&YZ 0.0000 9.8400
&N 2
&X 28.75
&DN 3
&YZ 0.0000 0.0000
&YZ 7.1000 0.0000
&YZ 7.1000 9.8400
&YZ 0.0000 9.8400

```

Рис. 1 Фрагмент файла \*.S2G

Строки с кодом &YZ содержат значения координат узловой точки шпангоутного сечения. Количество точек не ограничено. Запись значений координат точек начинается с координат нижней точки шпангоутного сечения, расположенной в ДП. Обход контура шпангоута производится против часовой стрелки. Ниже рассмотрены варианты решения задачи формирования электронной модели обводов корабля.

Вариант 1. В случае, когда имеется теоретический чертеж в электронном виде (к примеру, трехмерная модель корпуса в формате dxf, iges и т.д.), производится выборка данных о шпангоутных сечениях в формат \*.S2G.

Вариант 2. В случае, если теоретический чертеж имеется в форме распечатки на бумаге, производится перевод его в цифровую форму в специальном редакторе [2]. Координаты точек шпангоутов могут быть найдены прямо на чертеже при помощи линейки, либо сняты с отсканированного чертежа. В последнем случае требуется тщательная калибровка отсканированного изображения, но для сложных форм корпуса он оказывается более эффективным.

Вариант 3. При решении задачи оценки технического состояния эксплуатирующегося судна / корабля часто встречается случай, когда теоретический чертеж не доступен для инженера, а в наличии имеются только конструктивные сечения. Проблема решается следующим образом: с использованием редактора формы корпуса вводятся контуры точек имеющихся сечений – к примеру, мидель-шпангоута, поперечных сечений в носовом и кормовом районах. Затем, для сохранения гладкости модели обводов, вводятся промежуточные сечения с использованием информации о форме палуб и диаметрального батокса, которые также имеются на чертежах общего рас-

положения и продольном конструктивном разрезе корабля.

**Вариант 4.** В случае, когда в наличии нет достаточного количества конструктивных чертежей проводится построение теоретического чертежа классическими методами, с максимальным приближением формы корпуса к требуемой. Такими методами являются – интерполяционный, аффинного перестроения, варьирования длины цилиндрической вставки, а также генерации NURBS-поверхности по базовым линиям в системах трехмерного моделирования. Конкретный метод выбирается в зависимости от наличия близкого прототипа по форме корпуса.

После разработки цифровой модели, одним из вышеперечисленных способов проводится проверка характеристик формы корпуса – объемного водоизмещения, положения центра величины. При необходимости проводится корректировка модели.

Результат работы – каркасная модель формы корпуса применительно к надводному кораблю показана на рис. 2.

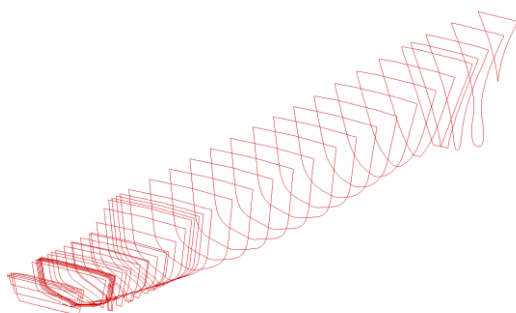


Рис.2 Геометрическая модель корпуса корабля

### 3. Геометрические модели внутренних структур корпуса корабля

Геометрическая модель внутренней конструкции (структуры) корпуса корабля (второго дна, палубы, платформы, продольной переборки и т. д.) – это совокупность точек, определяющая форму структуры в пространстве и в плане (в проекции на плоскость).

Необходимо ввести понятие «опорной геометрии» - совокупности поверхностей нулевой толщины, на которую накладываются листы обшивки и настилаются балки набора.

Модели опорной геометрии создаются с использованием информации по ней в так называемых контрольных сечениях (их должно быть не менее двух), под которыми понимаются те поперечные сечения корпуса, в которых точно известны параметры, определяющие форму структуры, в качестве которых могут быть углы наклона плоскостей, относительные координаты точек притыкания к другим структурам, абсолютные значения их ширины или высоты и т.д.

Значения параметров формы структуры в плоскости шпангоутов, расположенных между контрольными сечениями, определяются линейной интерполяцией. Параметры контрольных сечений задаются согласно общепроектным или конструктивным чертежам.

Анализ конструкции судов и кораблей показал значительное разнообразие форм их внутренних структур. Из всего многообразия может быть выделен ограниченный набор типовых схем, позволяющих с требуемой точностью определить все необходимые для расчетов геометрические характеристики структуры.

Ниже показаны примеры часто применяемых схем второго дна (рис. 3а-б) и второго борта (рис. 4а-б), верхней палубы (рис. 5а-г).

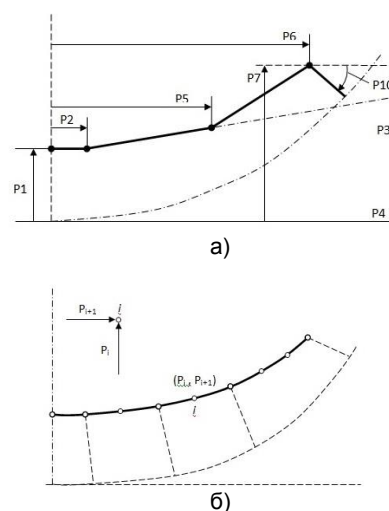
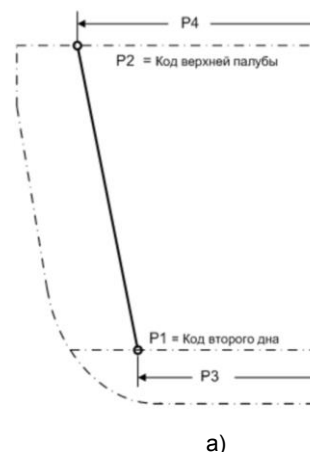


Рис.3 Типовые схемы второго дна



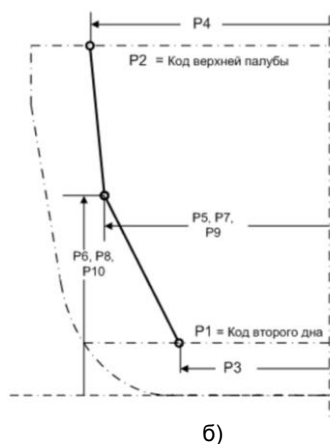


Рис. 4 Типовые схемы второго борта

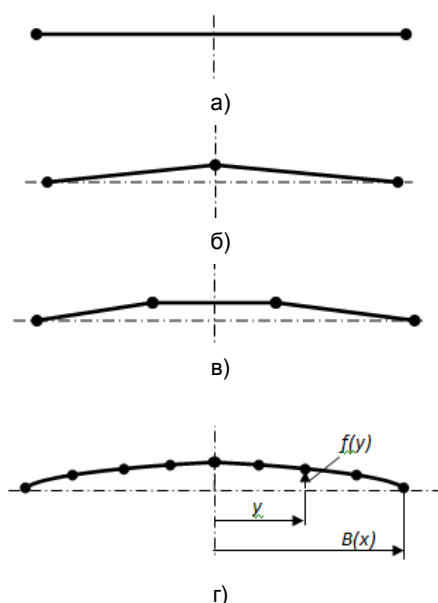


Рис. 5 Типовые схемы верхней палубы

Данные о контрольных сечениях, введенные в соответствии со схемами, сохраняются в файлы формата \*.ctr, имеющего универсальную структуру для описания всех конструктивных схем.

Пример файла 010102.ctr для второго дна показан на рис.6.

```

010102
Второе дно
6
152
0
-48.3
4
11
850
1500
*
*
*
*
*
0
*
*
*
    
```

Рис. 6 Формат файла \*.ctr на примере второго дна

В файле представлена следующая информация: символьный код структуры (в примере - «010102»); наименование структуры («второе дно»); количество сечений (6); номер шпангоута (152); смещение шпангоута (0); абсцисса сечения относительно миделя (-48.3); номер типовой схемы (4); количество расчетных параметров (11), характеризующих схему (P1-P11); численное значение параметра P1 (850); численное значение параметра P2 (1500); численные значения остальных параметров P3-P11 (здесь значения не обязательны, поэтому введены «\*»).

Опорная геометрия поперечно ориентированных структур (поперечных переборок, вертикальных диафрагм) может быть задана в универсальном виде – в виде совокупности точек контуров в плоскости YOZ или в виде ссылок на ограничивающие контур структуры.

Специальное программное обеспечение позволяет создавать модели поперечных структур как прямым вводом точек, так и с помощью ссылочных идентификаторов.

Ссылочный идентификатор – это код структуры, которая является ограничивающей для создаваемой модели. К примеру, для поперечной переборки, как минимум, достаточно ввести ссылки на второе дно, второй борт и верхнюю палубу – контур будет создан автоматически. Это дает возможность изменения положения структур без необходимости корректировки, по цепочке, всех связанных конструкций – это действие система проведет автоматически.

Окно программного модуля, предназначенного для формирования геометрической модели поперечных структур показано на рис. 7.



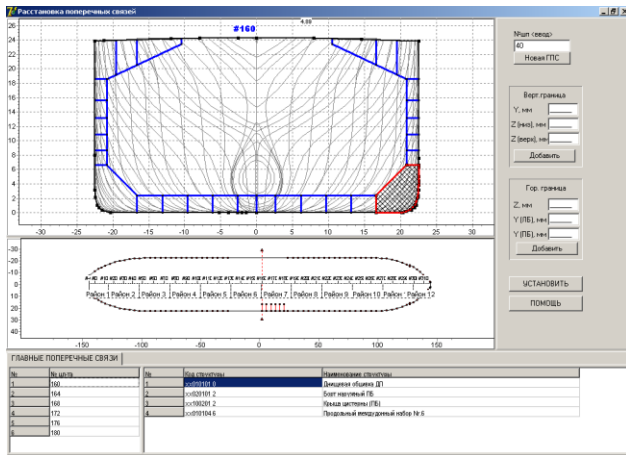


Рис. 7 Окно программного модуля, предназначенного для формирования геометрической модели поперечных структур

#### 4. Конструктивное моделирование - установка листов и балок на опорную геометрическую модель. Работа с растяжкой наружной обшивки

В практике проектирования корпусных конструкций работа с листами и балками наружной обшивки является, по факту, более сложной и трудоемкой, чем работа с внутренними конструкциями. Это связано с тем, что на большей части поверхности корпуса корабля имеют место криволинейные формы, на которых необходимо выделить листы обшивки, беззазорно стыкуя их с соседними. При подготовке данных для расчета корпусных конструкций стоит задача достаточно точного определения положения листов и балок, от чего зависит величина расчетной нагрузки, значения параметров листового элемента, величина расчетного пролета и расстояния между рассматриваемыми балками и т.д.

В практике оценки технического состояния кораблей часто встречается ситуация, когда в наличии нет ни трехмерной модели конструкций, ни результатов проектных расчетов прочности, а имеется только растяжка наружной обшивки и теоретический чертеж. Для определения трехмерных координат расчетных точек листа применяется специальный алгоритм наложения растяжки листа на теоретический чертеж корпуса.

Эта группа задач также решается специализированным программным модулем в следующем порядке:

- построение двух сечений корпуса, совпадающих с носовой и кормовой границами листа;
- нахождение двух точек на каждом сечении, совпадающих с нижней и верхней кромками листа;
- определение замкнутой совокупности отрезков, определяющих лист; визуализация листа; присвоение атрибутов текущему листу (наименования листа, кода, параметров);
- определение формы листов в районе углов вырезов;

- формирование таблиц базы данных, содержащих информацию о листах рассматриваемой структуры.

Каждый лист определяется координатами четырех точек. Границы листа по длине ( $x$ - координаты точек) задаются номером практического шпангоута  $j$  и смещением  $sm$ , в мм, вертикальной кромки листа относительно этого шпангоута. Такая информация указывается для кормовой ( $j_s, sm_s$ ) и носовой ( $j_f, sm_f$ ) кромок. Вертикальные границы листа на растяжке определяются координатами верхней и нижней точек на «растянутом» криволинейном контуре в плоскости кормовой  $\eta_s^{(i)}, \eta_s^{(i-1)}$  и носовой  $\eta_f^{(i)}, \eta_f^{(i-1)}$  кромок (рис. 8).

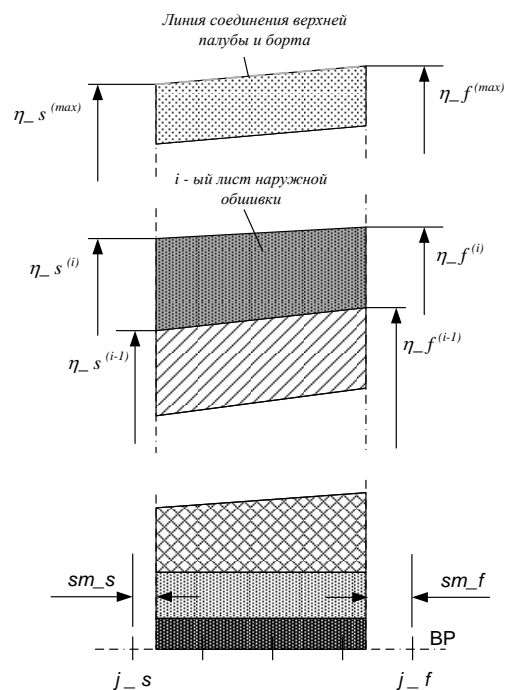


Рис. 8 Схема задания границ текущего листа по длине и высоте растяжки наружной обшивки

Для определения положения балок наружной обшивки применяется следующая последовательность действий:

- построение промежуточных сечений корпуса корабля, на которых лежат начальная и конечная точки балок;
- определение трехмерных координат начальной и конечной точек притыкания балки к наружной обшивки;
- нахождение промежуточных точек балки, в случае, если она не лежит на прямой линии;
- идентификация листов наружной обшивки, к которым примыкает балка. Задача решается методом перебора листов наружной обшивки и поиска такого листа, для которого точка, совпадающая с серединой пролета балки  $C_s$ , является внутриконтурной  $\sum \varphi_i = 2\pi$  (рис. 9);

- разделение балки на участки, по признаку примыкания к одному листу обшивки;
- нахождение расчетной точки балки для каждого участка.

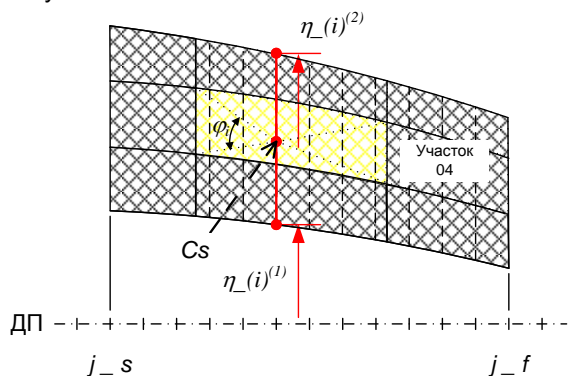


Рис. 9 К алгоритму идентификации листа, «накрывающего» середину пролета рассматриваемой балки. Желтым цветом выделен искомый лист.

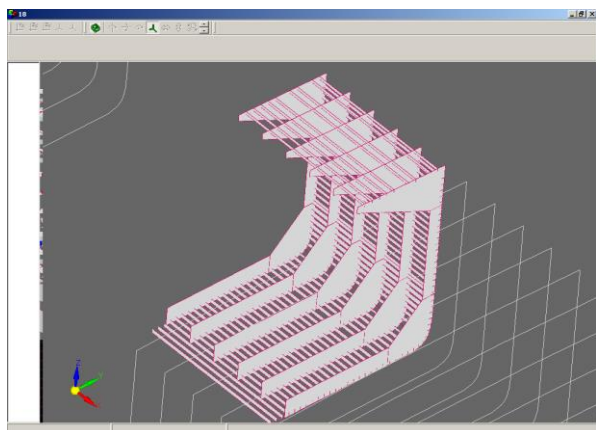


Рис. 10 Трехмерное представление балок и поперечных диафрагм на каркасной модели формы корпуса судна

Работа с листами и балками верхней палубы и внутренних конструкций в целом производится теми же методами, что применяются и для наружной обшивки. В ряде случаев (плоские палубы, плоское второе дно, внутренний борт) можно обойтись двумерными построениями.

Необходимо учитывать, что верхняя палуба, внутренние структуры (промежуточные палубы, платформы, продольные и поперечные переборки) имеют ряд геометрических и конструктивных особенностей, которые обуславливают особенности методик конструктивного моделирования их листовых конструкций по сравнению с растяжкой наружной обшивки. К таким особенностям относятся: наличие вырезов грузовых люков, машинных шахт в палубах и платформах; различные варианты геометрии в районе углов вырезов (скругление по радиуса, по дуге эллипса, другие формы); наличие сварных или накладных листов в районе углов вырезов люков.

## 5. Общая схема (алгоритм) геометрического и конструктивного моделирования корпуса судна/корабля и его структурных составляющих

Формирование геометрической модели корпуса производится в следующем порядке:

1. Формируется каркасная модель наружных обводов корпуса;
  2. На каркасной модели выделяются районы: днище, борт, верхняя палуба;
  3. Из иерархического списка выбирается тип структуры, для которой далее будет формироваться параметрическое описание (например: второе дно, вторая палуба и т.д.);
  4. Выбирается тип (номер) схемы, которая отражает форму структуры в рассматриваемом районе по длине корабля;
  5. Задаются параметры, определяющие положение контрольного сечения по длине корабля: номер практического шпангоута  $N_{sp}$  и смещение  $S_m$  относительно этого шпангоута;
  6. Вводятся параметры структуры согласно выбранной схеме;
  7. Действия пунктов 4 - 6 повторяются столько раз, сколько контрольных сечений принято для описания геометрии структуры. Количество контрольных сечений должно быть не менее двух. Типы (номера схем) смежных контрольных сечений должны быть одинаковыми. Описание геометрии структуры может быть сделано сразу для всего корпуса или для района (нескольких районов);
  8. Выполняется расчет значений параметров формы структуры в плоскости практических шпангоутов, расположенных между контрольными сечениями, используя формулы линейной интерполяции.
- Решение задач о пересечении внутренних структур с корпусом, и между собой - определение реальной геометрии структуры. Траектория линий притыкания (сопряжения) может быть проконтролирована в визуальном режиме [2].
- Формирование базы данных по листам и балкам набора в диалоговом режиме: работа с растяжкой наружной обшивки, планами настилов палуб, полотнищ переборок и т.п.
9. Автоматизированное наложение границ листов и трасс балок на трехмерные модели корпусных конструкций. Определение реальных размеров элементов конструкции (размеров листовых элементов, пролетов), положения расчетных точек для определения нагрузок.
  10. Визуализация результатов геометрического и конструктивного моделирования.

## 7. Программное обеспечение, реализующее алгоритмы создания геометрических и конструктивных моделей корпусных конструкций

Задачи геометрического и конструктивного моделирования конструкций решаются с помо-

щью программного комплекса, имеющего в своем составе следующие основные составляющие части:

- модуль геометрического «ядра», реализующего основные построения и преобразования – работу с точками, линиями, отрезками, контурами, поверхностями. Здесь происходит расчет пересечений, построение перпенди-куляров, расчет расстояний между геомет-рическими объектами;
- модуль работы с каркасной моделью обводов корпуса корабля (рис.11) – построение произвольных поперечных сечений, планов палуб, батоксов;

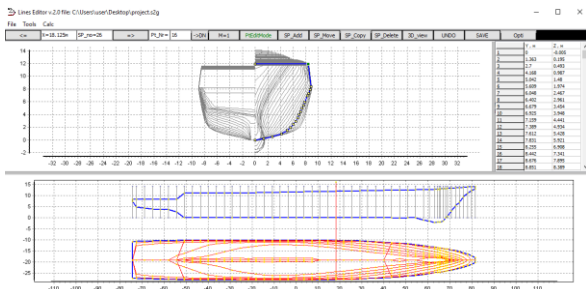


Рис. 11 Окно редактора формы корпуса

- транслятор каркасной модели из форматов машиностроительных САПР (рис.12) – здесь распознается положение шпангоутных сечений в пространстве, формирование их массива, сортировка сечения по оси X (от кормы к носу в порядке возрастания абсцисс), а точек таким образом, чтобы они образовывали контур шпангоута с направлением обхода против часовой стрелки.

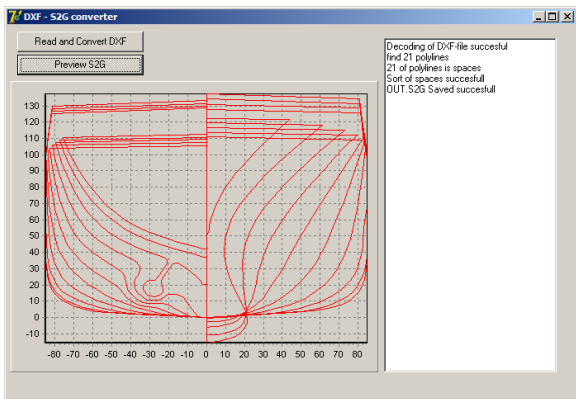


Рис.12 Окно транслятора перевода данных в формат S2G

- модуль работы с сечениями внутренних структур (рис.13) - ввод контрольных и построение промежуточных сечений, контроль их параметров, нахождение линий пересечения смежных структур;

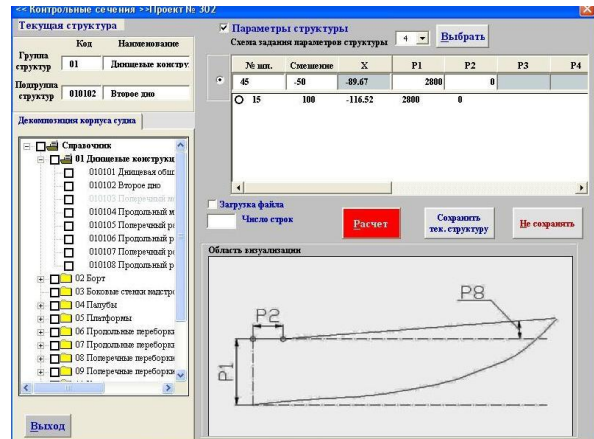


Рис.13 Модуль ввода контрольных сечений внутренних структур (надо картинку добавить)

- модуль работы с листами обшивки и настилов (рис. 14) – определение трехмерных координат кромок и стыков листов, положения расчетных точек;

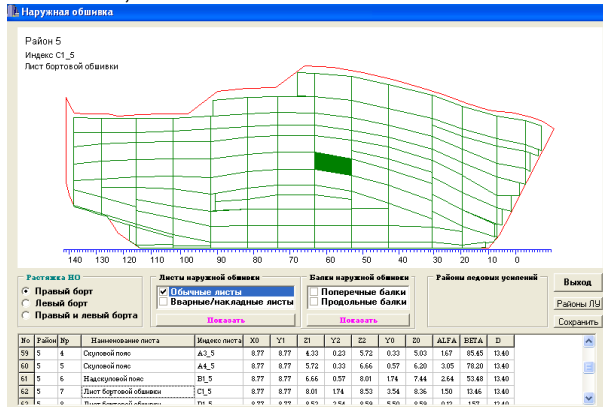


Рис.14 Конструктивная модель наружной обшивки – растяжка наружной обшивки и фрагмент базы данных

- модуль работы с балками набора (рис.15) – расчет трехмерных трасс примыкания балок к листам, разделение балок на участки, расчет расстояния между балками, построение линий пересечений балок и структур;

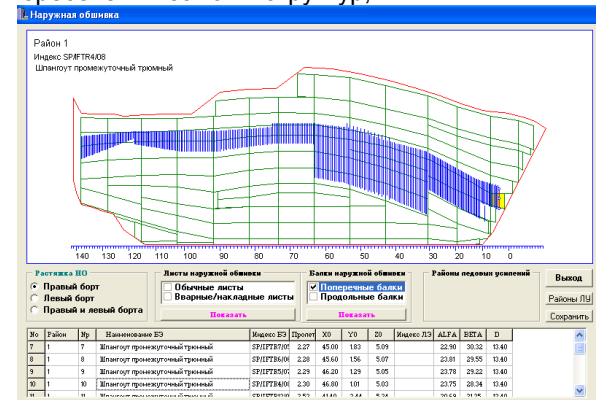


Рис. 15 Конструктивная модель основного набора наружной обшивки – фрагмент трассировки и базы данных

- вспомогательные модули, обеспечивающие ввод, хранение, обработку и передачу данных в

другие программные комплексы.

### Заключение

В настоящей статье представлены методы и алгоритмы геометрического и конструктивного моделирования, которые необходимы для проектирования / расчета прочности конструкций кор-

пуса судов и кораблей. Рассмотрены вопросы создания геометрической модели в условиях дефицита информации, а также способы автоматизации работы с моделью с целью уменьшения трудоемкости разработки новых проектов и оценки технического состояния эксплуатирующихся судов и кораблей.

### Литература

1. Тряскин В.Н. Автоматизированное параметрическое проектирование конструкций корпуса судна: учебное пособие/ В.Н. Тряскин. – СПб.: СПбГМТУ, 2010. – 152 с.
2. Рюмин С.Н., Якимов В.В. Создание, редактирование и контроль параметров формы корпуса судна, заданной каркасным способом. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015615831.
3. Тряскин В.Н. Методология автоматизированного проектирования конструкций корпуса судна: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.08.03. – Санкт-Петербург, 2007. – 339 с.
4. Правила классификации и постройки морских судов: СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015. Т. 1. 506 с.

### References

1. Trjaskin V.N. Avtomatizirovanoe parametriceskoe proektirovanie konstrukcij korpusa sudna: uchebnoe posobie, SPb, St.Peterburg State Marite Technical University, 2010, 152 p.
2. Ryumin S.N., Yakimov V.V. Sozdanie, redaktirovanie i kontrol parametrov formy korpusa sudna, zadannoy karkasnim sposobom. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registrazii programmy dlya EVM . №2015615831
3. Trjaskin V.N. Metodologija avtomatizirovannogo proektirovanija konstrukcij korpusa sudna: dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehniceskix nauk: 05.08.03. Sankt-Peterburg, 2007, 339 p.

Pravila klassifikacii i postrojki morskix sudov: SPb, Rossijskij morskij registr sudohod-stva, 2015, T. 1, 506

УДК 629.12.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕТТО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРОФИЛЬНОГО ПРОКАТА В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСА СУДОВ

**Плотников Кирилл Вадимович**

аспирант кафедры конструкции и технической эксплуатации судов,  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: plotnikov@smtu.ru

**Зуев Павел Сергеевич**

младший научный сотрудник  
АО «ЦНИИМФ»  
191015, Санкт-Петербург, ул. Кавалергардская, 6, лит.А  
e-mail: pasha-zuev@mail.ru

### Аннотация

Статья посвящена вопросам определения геометрических характеристик поперечного сечения балок катаного профиля, в т.ч. использования соответствующих процедур при автоматизированном параметрическом проектировании судовых корпусных конструкций. Сущность проблемы заключается в том, что современные нормативные документы, такие как Общие Правила МАКО (IACS CSR), содержат подход к нормированию размеров нетто конструкций корпуса судов. Применительно к балкам набора это означает, что для выбора их профиля необходимо знать характеристики поперечного сечения тех или иных балок из сортамента с уменьшенной по периметру профиля толщиной. Величина такого уменьшения толщины равна доле от добавки на износ и коррозию, нормируемой Правилами. Такой подход делает подбор балок из профильного проката – полособульбов, уголков и т.д., более трудоёмким, в том числе за счёт усложнения логики программного кода. В статье рассмотрены подходы, которые могут быть использованы для определения нетто-характеристик профиля: аналитическое описание контура профиля и последующее нахождение соответствующих интегралов, разбиение профиля на ряд простых фигур и нахождение характеристик сечения как их совокупности, а также описание контура набором точек и последующее численное интегрирование. Приведено сравнение результатов, полученных для нескольких профилей с результатами, полученными по упрощённому методу, предлагаемому в IACS CSR. Показано, что он применим только для несимметричных полособульбов европейского стандарта. Для полособульбов отечественных стандартов (несимметричного и симметричного) получены аппроксимирующие зависимости, позволяющие оценить уменьшение характеристик профиля при уменьшении его толщины.

**Ключевые слова:** автоматизированное проектирование конструкций, конструкция корпуса судов, коррозионная добавка, нетто-размеры балок, нормирование размеров нетто, Общие Правила МАКО, полособульбовый профиль, профильный прокат, ATLAS, CSR

## NET GEOMETRICAL PROPERTIES CALCULATION OF ROLLED STIFFENERS SECTIONS IN COMPUTER-AIDED SHIP STRUCTURE DESIGN

**Plotnikov Kirill Vadimovich**

postgraduate student of DEPARTMENT OF SHIP STRUCTURE AND TECHNICAL OPERATION,  
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: plotnikov@smtu.ru

**Zuev Pavel Sergeevich**

junior researcher  
JSC «CNIIMF»

Kavalergardskaya, 6A, St. Petersburg 191015, Russian Federation  
e-mail: pasha-zuev@mail.ru

## Abstract

The paper deals with direct calculations of rolled stiffeners cross-section geometrical properties, and the application of such calculations in computer-aided ship structures design. The essence of the task is related to the net scantlings approach to hull structures applied in modern Rules, such as IACS Common Structural Rules (CSR), IACS Requirements Concerning Polar Class, and Rules of some Classification Societies. As applicable to the stiffeners, the net scantling approach means that the geometrical properties of stiffeners are to be determined with corrosion magnitude deducted along the surface of the profile. This approach complicates the calculation of rolled stiffeners section properties (bulb sections primarily), together with the complications in developing the software code. Paper presents the simplified methods that can be used for direct calculation of profile cross-section geometrical properties. Such methods include the analytical description of section profile curve and consequent integration of such, splitting of cross-section into simple geometrical primitives, and description of section profile as a set of points with consequent numerical integration. The paper contains comparison between results obtained with the procedures developed, and the results given by simplified methods provided in IACS CSR, for several profiles. It is shown that formulas from CSR cannot be used for bulb sections of Russian standard (GOST). The equivalent angle approach, as applicable to the bulb profile, is modified, and can be applied with GOST bulb profiles. For symmetrical bulb profiles of Russian standard, the regressions are developed, applicable for the quick estimation of geometrical properties reduction due to corrosion.

**Key words:** ATLAS software, bulb profiles, corrosion addition, computer-aided design, CSR, GOST, net scantling approach, profile cross-section, rolled stiffeners, section properties, stiffeners scantlings

## Введение

Масса балок набора составляет около 30% массы металлического корпуса судна [1]. При строительстве судов активно применяется как профильный прокат, так и составные сварные профили, изготавливаемые, как правило, непосредственно на судостроительном предприятии. Выбор типа профиля балок набора зависит от многих факторов и обычно производится на достаточно ранних этапах проектирования судна. Помимо очевидных технологических, организационно-экономических и эксплуатационных требований к такому выбору (возможность и условия поставки, возможности технологического оборудования, особенности будущей эксплуатации судна и т.д.), требования Правил и Норм проектирования также содержат ряд требований, приводящих к целесообразности выбора того или иного типа профиля.

К размерам балок основного набора судовых корпусных конструкций в общем случае могут предъявляться требования к местной прочности на изгиб и сдвиг (срез), устойчивости балки под действием сжимающих усилий, требования к жёсткости, устойчивости свободного пояса, а также некоторые другие. В любом случае, основными расчётными параметрами, определяющими размеры профиля балки, являются требуемые моменты сопротивления и инерции её поперечного сечения, а также требуемая площадь поперечного сечения её стенки.

Правила целого ряда зарубежных классификационных обществ, а также вступившие в силу на уровне МАКО нормативные документы, такие как Общие Правила МАКО (IACS CSR) [2] содержат подход к нормированию размеров *нетто* конструкций корпуса судов (*net scantling approach*). Это означает, что требования Правил нормируют некие базовые размеры конструкций, а построечная толщина

формируется за счёт прибавления к ним добавки на коррозию и некоторой добавки, которая может быть назначена по желанию проектанта или судовладельца. Такой подход в целом совпадает с подходом, описанным в Правилах РМРС [3], однако имеет ряд существенных особенностей.

Данная статья посвящена одной из таких особенностей. При проектировании балок набора, а также при проверке их размеров на соответствие требованиям Правил производится сравнение характеристик их поперечного сечения (фактического при проверке размеров или подбираемого при проектировании) с требуемыми значениями. При описанном выше подходе нормируемые Правилами величины момента сопротивления  $Z_{net}^1$ , см<sup>3</sup>, момента инерции  $I_{net}$ , см<sup>4</sup>, и площади стенки  $A_{w-net}$ , см<sup>2</sup>, балки с присоединённым пояском также являются характеристиками *нетто*, т.е. не учитывают коррозионную добавку к толщине  $t_c$ , мм. Таким образом, для выбора профиля прокатной балки (или проверки его размеров) необходимо знать характеристики поперечного сечения тех или иных профилей из сортамента с уменьшенной по периметру толщиной (то есть характеристики поперечного сечения «равномерно изношенной балки», см.рис.1). Величина уменьшения равна половине величины коррозионной добавки, нормируемой Правилами. При определении характеристик *нетто* толщина присоединённого пояса балки также должна быть уменьшена на величину коррозионной добавки. В общем случае величина  $t_c$  для балки и присоединённого пояса может быть неодинакова.

<sup>1</sup> Для характеристик сечения здесь и далее авторы использовали, где это возможно, обозначения из [2].

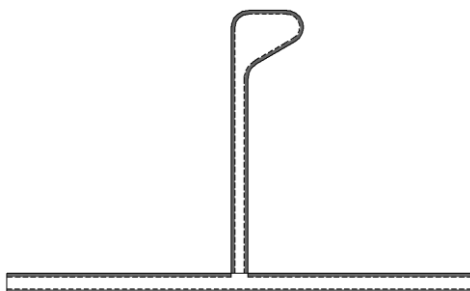


Рис. 1. Уменьшение толщины профиля и присоединённого пояска по периметру

Описанный выше подход делает подбор балок из профильного проката – полособульбов, катаных уголков и т.д., более трудоёмким, т.к. требует вычисления характеристик нетто балок из сортамента для заданной величины  $t_c$ . С точки зрения реализации процедуры подбора и проверки размеров профиля в системах автоматизированного проектирования указанный факт усложняет логику программного кода.

Правилами [2] предполагается, что проектант может использовать как «прямой» (*direct calculation*) метод определения характеристик нетто сечений, так и упрощённый метод приведения профиля к эквивалентному составному уголку. Упрощённый метод применим только для несимметричных полособульбов и приводит к определённой погрешности, оцениваемой в разделе 2 данной статьи.

### 1. Методы определения характеристик нетто профиля и пути их реализации

Для определения фактических значений  $Z_{net}$  и  $I_{net}$  для поперечного сечения балки с присоединённым пояском известных размеров необходимо знать характеристики нетто изолированного профиля балки. Это площадь нетто поперечного сечения  $A_{0-net}$ , см<sup>2</sup>, аппликата нетто центра тяжести профиля  $Z_{0-net}$ , см, собственный момент инерции нетто  $I_{0-net}$ , см<sup>4</sup>. Известными являются размеры исходного профиля, однозначно описывающие его в рамках одного сортамента, а также величина коррозионной добавки  $t_c$ , мм.

Рассмотрим задачу определения характеристик сечения нетто на примере несимметричного полособульба европейского стандарта EN 10067 (DIN 1019) [4], широко применяемого в настоящее время в мировом и отечественном судостроении.

Сортаментные геометрические характеристики, однозначно описывающие указанный профиль – это толщина стенки  $s$ , высота профиля  $b$ , ширина пояска (бульба) без учёта толщины стенки  $c$  и радиус скругления  $r^2$ .

Наиболее точно определить  $A_{0-net}$  позволяет интегрирование, т.е. простейшая процедура нахождения площади под кривой. При этом контур профиля должен быть задан аналитически (в виде нескольких функций с определёнными граничными условиями или набора точек). Профиль несиммет-

ричного полособульба по [4] удобно задать четырьмя функциями (см. рис.2).

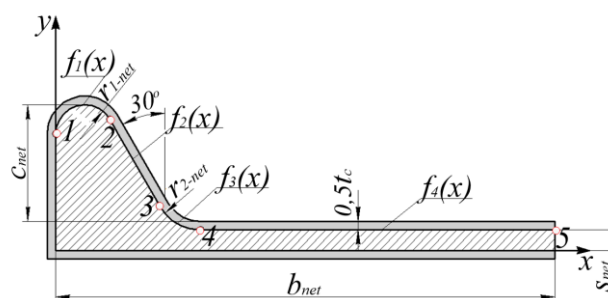


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая определение характеристик нетто профиля методом интегрирования

Профиль нетто («изношенный» профиль) будет описывать следующие параметры:

$$c_{net} = c - 0,5t_c;$$

$$b_{net} = b - 0,5t_c;$$

$$s_{net} = s - t_c;$$

$$r_{1-net} = r - 0,5t_c;$$

$$r_{2-net} = r + 0,5t_c.$$

Систему координат рационально выбрать таким образом, как показано на рис.2, а интегрирование производить по  $x$ . Пределы интегрирования определяются пятью точками, абсциссы которых представлены ниже:

$$x_1 = 0;$$

$$x_2 = r_{1-net} \cdot \left(1 + \sin \frac{\pi}{3}\right);$$

$$x_3 = x_{0-2} - r_{2-net} \sin \frac{\pi}{3};$$

$$x_4 = x^* + r_{2-net} \cdot \text{tg} \frac{\pi}{6};$$

$$x_5 = b_{net},$$

$$\text{где } x^* = x_2 + \frac{s_{net} - y_{0-1} - \sqrt{r_{1-net}^2 - (x_2 - x_{0-1})^2}}{\text{tg} \left(\frac{4\pi}{6}\right)},$$

$y_{0-1}$  – ордината центра скругления пояска (бульба), см. ниже.

Контур задаётся следующими функциями:

$$f_1(x) = y_{0-1} + \sqrt{r_{1-net}^2 - (x - x_{0-1})^2}; \quad (1)$$

$$f_2(x) = \text{tg} \frac{4\pi}{6} \cdot (x - x_2) + y_2; \quad (2)$$

$$f_3(x) = y_{0-2} - \sqrt{r_{2-net}^2 - (x - x_{0-2})^2}; \quad (3)$$

<sup>2</sup> Приведены обозначения из [4].

$$f_4(x) = S_{net}, \quad (4)$$

$$y_{0-2} = S_{net} + r_{2-net}.$$

где координаты центров скругления:

Ордината  $y_2$  для использования в (2) может быть получена подстановкой  $x=x_2$  в (1).

$$x_{0-1} = r_{1-net},$$

$$y_{0-1} = C_{net} + S_{net} - r_{1-net} + 0,5t_c,$$

Площади соответствующих криволинейных трапеций:

$$x_{0-2} = x_4,$$

$$A_{0-net-1} = \int_{x_1}^{x_2} f_1(x)dx = y_{0-1}(x_2 - x_1) + \frac{1}{2}((x_2 - x_{0-1})\sqrt{r_{1-net}^2 - (x_2 - x_{0-1})^2} - r_{1-net}^2 \arccos(\frac{x_2 - x_{0-1}}{r_{1-net}}) - \frac{1}{2}((x_1 - x_{0-1})\sqrt{r_{1-net}^2 - (x_1 - x_{0-1})^2} - r_{1-net}^2 \arccos(\frac{x_1 - x_{0-1}}{r_{1-net}})); \quad (5)$$

$$A_{0-net-2} = \int_{x_2}^{x_3} f_2(x)dx = y_2(x_3 - x_2) + \sqrt{3} \left( x_2 x_3 - x_2^2 - \frac{x_3^2 - x_2^2}{2} \right); \quad (6)$$

$$A_{0-net-3} = \int_{x_3}^{x_4} f_3(x)dx = y_{0-2}(x_4 - x_3) - \frac{1}{2}((x_4 - x_{0-2})\sqrt{r_{2-net}^2 - (x_4 - x_{0-2})^2} - r_{2-net}^2 \arccos(\frac{x_4 - x_{0-2}}{r_{2-net}})) + \frac{1}{2}((x_3 - x_{0-2})\sqrt{r_{2-net}^2 - (x_3 - x_{0-2})^2} - r_{2-net}^2 \arccos(\frac{x_3 - x_{0-2}}{r_{2-net}})); \quad (7)$$

$$A_{0-net-4} = \int_{x_4}^{x_5} f_4(x)dx = S_{net}(x_5 - x_4). \quad (8)$$

Общая площадь  $A_{0-net}$  равна сумме:

$$A_{0-net} = \sum_{n=1}^4 A_{0-net-n}. \quad (9)$$

$$i_{y-net-n} = \int_{x_i}^{x_{n+1}} x^2 dx \int_0^{f_n(x)} dy, n=1, \dots, 4.^3 \quad (13)$$

Статический момент площади относительно оси  $y$  может быть найден как

Осевой момент инерции нетто профиля относительно центральной оси, параллельной оси  $y$ :

$$S_y = \int_A x dA = \iint_A x dx dy, \quad (10)$$

$$i_{0-net} = \sum_{i=1}^4 i_{y-net} - (b_{net} - z_{0-net})^2 \cdot A_{0-net}. \quad (14)$$

где  $A$  – площадь, представляющая область интегрирования.

Представленное выше аналитическое решение может быть реализовано в программном виде, однако нельзя не отметить тот факт, что выражения (11) и (13) являются достаточно громоздкими и требуют большой внимательности при написании программного кода.

Статический момент площади нетто всего сечения относительно будет равен сумме статических моментов площадей криволинейных трапеций:

Значительно проще решение задачи определения геометрических характеристик нетто катаного профиля может быть получено при помощи процедур численного интегрирования. В большинстве современных математических пакетов для ПК существуют удобные инструменты для их реализации.

$$S_{y-net} = \sum_{n=1}^4 S_{y-net-n},$$

$$S_{y-net-n} = \int_{x_n}^{x_{n+1}} x dx \int_0^{f_n(x)} dy, n=1, \dots, 4. \quad (11)$$

Отстояние центра тяжести площади нетто профиля от крайней нижней точки стенки равно

В составе систем автоматизированного проектирования корпусных конструкций алгоритм нахождения характеристик профиля также может содержать процедуры численного интегрирования. Используя известные функции (1)-(4) необходимо

$$z_{0-net} = b_{net} - \frac{S_{y-net}}{A_{0-net}}. \quad (12)$$

Собственные моменты инерции каждой из криволинейных трапеций относительно оси  $y$ :

<sup>3</sup> Полные аналитические решения интегралов для определения статических моментов и моментов инерции криволинейных трапеций в тексте статьи не приводятся в силу их излишней громоздкости.



сформировать массив, содержащий координаты точек, описывающих профиль. Практика показывает, что для решения рассматриваемой задачи удобно пользоваться т.н. методом (правилом) трапеций. Данный метод основан на замене ограничивающей площадь кривой, ломаной линией, проходящей через рассматриваемые точки. Принципы определения площади с использованием метода трапеций широко освещены в литературе. Для каждой из трапеций также могут быть определены координаты центра тяжести, статический момент площади, собственный и переносный момент инерции. После этого могут быть найдены интегральные характеристики профиля<sup>4</sup>.

Очевидно, что одним из приёмов повышения точности решения в данном случае будет увеличение количества точек, описывающих профиль в районе криволинейных участков (скруглений). В табл. 1 показано сопоставление результатов аналитического и численных расчётов (приведены площади профиля нетто и момента инерции профиля нетто) для балок из сортамента [4] при значениях  $t_c=0$  и  $t_c=3$  мм.

Таблица 1  
Сопоставление полученных площадей (верхнее число в ячейке в см<sup>2</sup>) и моментов инерции (нижнее число в ячейке в см<sup>4</sup>) профилей

№ п/п	Тип решения	HP 240x12		HP 430x17	
		$t_c=0$	$t_c=3$ мм	$t_c=0$	$t_c=3$ мм
1	Точное решение	37,29	29,24	102,78	88,38
		2127	1670	18853	16134
2	Числ. решение, вар.1	37,13	29,13	102,21	87,89
		2116	1662	18735	16041
3	Числ. решение, вар.2	37,23	29,20	102,57	88,20
		2123	1667	18806	16097
4	Числ. решение, вар.3	37,28	29,24	102,77	88,37
		2127	1670	18848	16130

Результаты численных расчётов в табл. 1 приведены для трёх вариантов (см.рис.3):

- скругления описываются четырьмя точками (всего 12 точек на профиль);
- скругления описываются 6-ю точками (всего 16 точек на профиль);
- верхнее скругление описывается 16-ю, нижнее 6-ю точками (всего 26 точек на профиль).

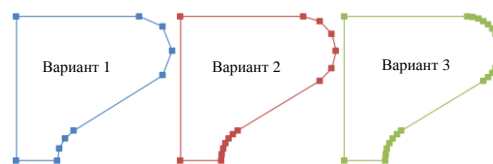


Рис. 3. Варианты описания контура пояска полособульба

Анализ значений, приведённых в табл.1, показывает, что даже при довольно примитивном описании криволинейных участков профиля погрешность результата, получаемого с использованием численного интегрирования, не превышает 1%, а при описании профиля 26-ю точками аналитическое и численное решения практически совпадают. Стоит отметить, что увеличение количества точек, описывающих контур при написании программного кода не вызывает трудностей. Так, в разработанном авторами программном обеспечении профиль полособульбов по ГОСТ [5] описывается 155-ю точками.

Также может быть предложен метод, не требующий прямого аналитического описания профиля. Искомая площадь может быть разбита на некоторое количество простейших фигур (см. рис.4), для каждой из которых нетрудно выразить площадь, положение центра тяжести, собственный момент инерции через известные размеры-нетто профиля. Затем могут быть найдены геометрические характеристики совокупности фигур.

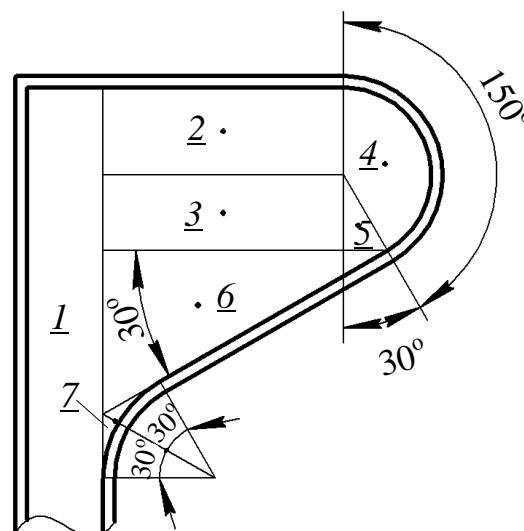


Рис. 4. Предложенное разделение площади полособульба на простейшие фигуры (точками показаны центры тяжести фигур)

## 2. Замечания по поводу использования упрощённых методов

Методы, описанные в разделе 1 данной статьи, безусловно, не предполагают их использование для проведения расчётов «вручную» и предварительно должны быть реализованы в какой-либо программной среде. Правила [2] допускают использование упрощённой методики, основанной на приведении полособульбового профиля к эквивалентному угловому. Так, полособульбу с высотой стенки  $h'_w$  и толщиной стенки  $t'_w$  соответствует уголок с высо-

<sup>4</sup> Традиционные численные методы интегрирования были приспособлены для задач автоматизированного проектирования судовых конструкций к.т.н. доцентом Ю.А. Смирновым и активно используются на кафедре конструкции и технической эксплуатации судов при разработке программного обеспечения

той стенки  $h_w$ , толщиной стенки  $t_w = t'_w$ , шириной свободного пояска  $b_f$  и толщиной свободного пояска  $t_f$  (рис.5):

$$h_w = h'_w - \frac{h'_w}{9,2} + 2; \quad (15)$$

$$b_f = \alpha \left( t'_w + \frac{h'_w}{6,7} - 2 \right); \quad (16)$$

$$t_f = \frac{h'_w}{9,2} - 2, \quad (17)$$

где  $\alpha = 1,1 + \frac{(120 - h'_w)^2}{3000}$  при  $h'_w \leq 120$ ,

$\alpha = 1$  при  $h'_w > 120$ .

Следует отметить, что для эквивалентного уголка выполняется условие равенства его высоты высоте исходной балки:

$$h'_w = h_w + t_f,$$

что важно при последующем определении момента сопротивления профиля с присоединённым пояском.

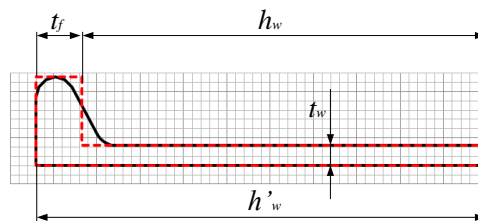


Рис.5. Приведение несимметричного полосо-бульба к эквивалентному уголку

Результаты, приведённые в табл. 2 позволяют судить о точности приближённой методики. Можно сделать следующие основные выводы:

Таблица 2

Сопоставление характеристик несимметричных полосо-бульбовых профилей различных стандартов и эквивалентных им согласно методике из IACS CSR угловых профилей (в скобках указана погрешность)

№ п/п	Профиль		Хар-ки	Точное решение		Приведение к экв. уголку	
	исходный	эквивалентный ( $h_w \times t_w / b_f \times t_f$ )		$t_c=0$	$t_c=3$ мм	$t_c=0$	$t_c=3$ мм
1	HP 100x7 (DIN 1019)	91,13 x 7 / 24,57 x 8,87 при $t_c=0$	$A_{0-net}$ , см <sup>2</sup>	8,74	5,36	8,56 (2,19%)	4,97 (7,29%)
		92,63 x 4 / 21,57 x 5,87 при $t_c=3$ мм	$Z_{0-net}$ , см	5,87	6,09	5,83 (0,77%)	5,89 (3,42%)
			$I_{0-net}$ , см <sup>4</sup>	85	52	85 (0,56%)	49 (5,55%)
2	HP 180x9 (DIN 1019)	162,43 x 9 / 33,87 x 17,57 при $t_c=0$	$A_{0-net}$ , см <sup>2</sup>	20,66	14,64	20,57 (0,44%)	14,33 (2,11%)
		163,93 x 6 / 30,87 x 14,57 при $t_c=3$ мм	$Z_{0-net}$ , см	10,73	11,09	10,72 (0,04%)	11,00 (0,81%)
			$I_{0-net}$ , см <sup>4</sup>	663	472	665 (0,29%)	467 (1,06%)
3	HP 430x17 (DIN 1019)	385,26 x 17 / 79,18 x 44,74 при $t_c=0$	$A_{0-net}$ , см <sup>2</sup>	102,78	88,38	100,92 (1,82%)	85,94 (2,76%)
		386,76 x 14 / 76,18 x 41,74 при $t_c=3$ мм	$Z_{0-net}$ , см	26,95	27,50	26,81 (0,51%)	27,26 (0,85%)
			$I_{0-net}$ , см <sup>4</sup>	18853	16134	18787 (0,35%)	15991 (0,88%)
4	№ 10 (ГОСТ 21937-76)	91,13 x 6 / 23,34 x 8,87 при $t_c=0$	$A_{0-net}$ , см <sup>2</sup>	8,63	5,18	7,54 (12,6%)	3,97 (23,27%)
		92,63 x 3 / 20,34 x 5,87 при $t_c=3$ мм	$Z_{0-net}$ , см	6,29	6,77	5,93 (5,76%)	6,11 (9,66%)
			$I_{0-net}$ , см <sup>4</sup>	83	48	76 (9,51%)	40 (15,54%)
5	№ 18a (ГОСТ 21937-76)	162,43 x 9 / 33,87 x 17,57 при $t_c=0$	$A_{0-net}$ , см <sup>2</sup>	22,18	16,07	20,57 (7,3%)	14,33 (10,8%)
		163,93 x 6 / 30,87 x 14,57 при $t_c=3$ мм	$Z_{0-net}$ , см	11,13	11,57	10,72 (3,64%)	11,00 (4,96%)
			$I_{0-net}$ , см <sup>4</sup>	713	511	665 (6,6%)	467 (8,68%)

- формулы (15)-(17) были получены применительно к несимметричным полосо-бульбам европейского стандарта [4] и дают довольно точный результат. Погрешность при их использовании в целом не превышает 2-3% и увеличивается при увеличении  $t_c$ . Несколько большая погрешность наблюдается для профилей с высотой стенки  $h'_w \geq 120$  мм при  $t_c \geq 2$  мм.

- наибольшая погрешность наблюдается для параметра  $A_{0-net}$ .

- формулы (15)-(17) неприменимы для несимметричных полосо-бульбов по ГОСТ

[5], т.к. дают большую погрешность (за счёт иного соотношения размеров профиля и наличия скругления с тыльной стороны бульба). Также формулы неприменимы для симметричных полосо-бульбов по [6].

### 3. Приближённый метод определения характеристик нетто полособульбов отечественного стандарта

Как было показано в разделе 2 данной статьи, формулы (15)-(17), приводимые в IACS CSR, были получены для несимметричных полособульбов европейского стандарта. Это привело авторов к мысли о том, что приближённые методики определения характеристик нетто поперечного сечения могут быть получены для профильного проката отечественного стандарта.

Т.к. перемещение горизонтальной нейтральной оси в направлении полки (бульба), а также уменьшение площади поперечного сечения и момента инерции изолированного профиля с увеличением коррозионной добавки  $t_c$  изменяются линейно, то характеристики нетто могут определяться как

$$A_{0-net} = A_0 - \Delta A_1 \cdot t_c; \quad (18)$$

$$z_{0-net} = z_0 - \Delta z_1 \cdot t_c; \quad (19)$$

$$i_{0-net} = i_0 - \Delta i_1 \cdot t_c, \quad (20)$$

где  $\Delta A_1, \Delta z_1, \Delta i_1$  – величины изменения соответствующих параметров при  $t_c = 1$  мм;  $A_0, z_0, i_0$  – соответствующие характеристики изолированного профиля из сортамента.

Также довольно удобным следует признать метод приведения профиля к эквивалентному составному профилю.

С целью вывода формул аналогичных (15)-(17) необходимо для каждого профиля из рассматриваемого сортамента найти эквивалентный, а затем подобрать аппроксимационные зависимости, связывающие размеры эквивалентного профиля и исходного. Подбор эквивалентного углового профиля может быть осуществлён путём решения задачи нелинейного программирования. Необходимо минимизировать функцию

$$F(X) = A_0 - A_{0-eq} \quad (21)$$

при наличии ограничений

$$h_1(X) = z_0 - z_{0-eq} = 0; \quad (22)$$

$$h_2(X) = i_{0-net} - i_{0-eq} = 0, \quad (23)$$

$$\text{где } A_{0-eq} = 0,01 \cdot (x_1 x_2 + (h'_w - x_2) t_w),$$

$$z_{0-eq} = 0,1 \left( \frac{x_1 x_2 (h'_w - 0,5 x_2) + 0,5 t_w (h'_w - x_2)^2}{x_1 x_2 + t_w (h'_w - x_2)} \right),$$

$$i_{0-eq} = 10^{-4} \left( \frac{(h'_w - x_2)^3 \cdot t_w + x_1 x_2^3}{12} + \right.$$

$$\left. + x_1 x_2 (h'_w - 0,5 x_2)^2 + 0,25 t_w (h'_w - x_2)^3 - z_0^2 A_0 \right),$$

$t_w = t'_w$  – толщина стенки эквивалентного профиля,

$A_0$  (см<sup>2</sup>),  $z_0$  (см),  $i_0$  (см<sup>4</sup>) – характеристики исходного профиля из сортамента,  $h'_w$  (мм) и  $t'_w$  (мм) – высота исходного профиля.

Вектор варьируемых параметров представляется в виде

$$X = \{x_1, x_2\}^T,$$

$x_1 = b_f$  – ширина свободного пояска (полки) эквивалентного уголка, мм;

$x_2 = t_f$  – толщина свободного пояска (полки) эквивалентного уголка, мм.

Авторами получены представленные ниже формулы для несимметричных полособульбов по ГОСТ. Форма зависимостей в целом принята сходной с приведённой в IACS CSR (см. (15)-(17)):

$$t_f = \frac{h'_w \alpha_1}{9,8} + 3,4 b_1 \quad (24)$$

$$b_f = t'_w + \frac{h'_w \alpha_2}{8,1} + 5,6 b_2 \quad (25)$$

$$t_w = t'_w \quad (26)$$

$$h_w = h'_w - t_f, \quad (27)$$

где коэффициенты  $\alpha_1, \alpha_2, b_1, b_2$  следует принимать согласно табл.3.

Таблица 3

Коэффициенты для формул (24) и (25)

Профили по ГОСТ 21937-76	$\alpha_1$	$b_1$	$\alpha_2$	$b_2$
Профили с $h'_w < 120$	1,23	0,66	1,07	0,77
Профили типа «б»	0,90	1,66	1,04	0,79
Остальные профили	1,00	1,00	1,00	1,00

На примере профиля №146 рис.6 иллюстрирует отличие результата, полученного по формулам (24)-(26) (с учётом табл.3) и по формулам (15)-(17).

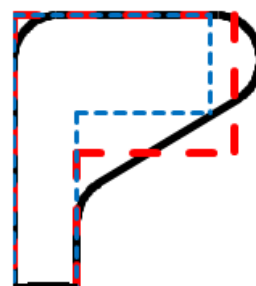


Рис.6. Приведение несимметричного полособульба №146 к эквивалентному уголку. Красная линия – предлагаемый профиль, синяя – по формулам из IACS CSR

Для симметричных полособульбов по ГОСТ также могут быть получены эквивалентные состав-

ные профили. Однако структура сортамента [6] затрудняет построение простых формул типа (24)-(27). По этой причине для симметричных полособульбов получены зависимости типа (18)-(20):

$$A_{0-net} = A_0 - 1,6154(h'_w t'_w)^{-0,38} \cdot t_c; (27)$$

$$Z_{0-net} = Z_0 - 0,617(h'_w t'_w)^{-0,546} \cdot t_c; (28)$$

$$i_{0-net} = i_0 - 1,9391(h'_w t'_w)^{-0,399} \cdot t_c. (29)$$

### Заключение

В данной статье рассмотрены вопросы определения характеристик нетто поперечных сечений

профильного проката для задач проектирования конструкций корпуса судна. Указанные методы применены в настоящее время при разработке ПО Atlas Prescriptive, разрабатываемого в СПбГМТУ по заказу Российского морского регистра судоходства. Подход к нормированию характеристик нетто балок набора не просто усложняет процесс проектирования конструкций, но и, в конечном счёте, влияет на его результат. Стоит отметить, что рассмотренная в статье проблема может быть сформулирована как определение характеристик сечения равномерно изношенного профиля. Таким образом, основные положения, приведённые в тексте, могут также быть применены для задач оценки технического состояния судов в эксплуатации.

### Литература

1. Лазарев В.Н., Юношева Н.В. Проектирование конструкций судового корпуса и основы прочности судов. Л.: Судостроение, 1989
2. IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers. IACS, 2015
3. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Том 1. Часть II. «Корпус». СПб.: РМРС, 2016
4. DIN EN 10067:1996-12. Hot rolled bulb flats - Dimensions and tolerances on shape, dimensions and mass; German version EN 10067:1996.
5. ГОСТ 21937-76. Полособульб горячекатаный несимметричный для судостроения. Сортамент. М.: ИПК «Издательство стандартов», 2000
6. ГОСТ 9235-76. Полособульб горячекатаный симметричный для судостроения. Сортамент. М.: ИПК «Издательство стандартов», 1999

### References

1. Lazarev V.N., Yunosheva N.V. Proektirovanie konstruktsiy sudovogo korpusa i osnovy prochnosti sudov. Leningrad, Sudostroenie, 1989
2. IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers. IACS, 2015
3. Russian Maritime Register of Shipping. Rules for the Classification and Construction of Seagoing Ships. Vol 1. Part II. «Hull». Saint-Petersburg, RMRS, 2016
4. DIN EN 10067:1996-12. Hot rolled bulb flats - Dimensions and tolerances on shape, dimensions and mass; German version EN 10067:1996.
5. GOST 21937-76. Hot-rolled steel. Unsymmetrical bulb for shipbuilding. Dimensions. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2000
6. GOST 9235-76. Hot-rolled steel. Symmetrical bulb for shipbuilding. Dimensions. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1999

УДК 533.682; 533.6.071.3

## УСТАНОВКА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

**Бесядовский Александр Романович**

кандидат технических наук, доцент,  
профессор кафедры гидроаэромеханики и морской акустики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: ar.bes@mail.ru

**Морозов Алексей Юрьевич**

магистр кафедры гидроаэромеханики и морской акустики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: morozov1280@gmail.com

### Аннотация

В работе рассмотрена установка для проведения нестационарных экспериментов в аэродинамической трубе СПбГМТУ. Приведена схема механической установки, перемещающей модель в потоке. Установка дополнена системой измерений. Система состоит из датчиков, блока преобразователей электрических сигналов, быстродействующего аналого-цифрового преобразователя с микропроцессором и управляющего компьютера. Управляющие программы, разработанные специально для этих целей, обеспечивают подготовку и проведение измерений, выявление и обработку ошибок, графическое представление результатов. Измерительный комплекс обеспечивает изучение широкого диапазона параметров, характеризующих взаимодействие различных объектов с набегающим потоком. Возможно измерение всех компонентов сил, моментов, поля скорости и давления. Ведется непрерывный контроль за скоростью потока в аэродинамической трубе. Комплекс обеспечивает интерактивную связь экспериментатора с оператором аэродинамической трубы. Предлагаемая установка позволяет получить информацию о силах и моментах нестационарной природы и их производных, действующих на модель, перемещающуюся в потоке.

Ключевые слова: Аэродинамические измерения, аэродинамический эксперимент, измерительная система, силы и моменты, нестационарное движение, производные сил и моментов.

## EQUIPMENT FOR UNSTEADY TESTS IN WING TUNNEL

**Besyadovskiy Alexander Romanovich**

assistant professor, Ph.D.,  
the professor of DEPARTMENT OF HYDROAEROMECHANIC AND MARINE ACOUSTICS,  
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: ar.bes@mail.ru

**Morozov Alexey Yurevich**

the magistr of DEPARTMENT OF HYDROAEROMECHANIC AND MARINE ACOUSTICS,  
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: morozov1280@gmail.com

## Abstract

In this paper is discussed the equipment for unsteady tests, used in the wind tunnel SMTU. The scheme of the mechanical part for moving model in a stream is shown. Equipment is added by the system for measurements.

The system includes the sensors, the block of converters of electric signals, the high-speed analogue-digital converter controlled by microprocessor and the host computer. The code developed specially for these purposes, provide preparation and performance of measurements, searching and processing of errors, and plot the results. The system provides testing of a wide range of the interaction parameters of various objects with the flow. It is a possible to measure the all components of the forces, the moments, fields of speed and pressure distribution. Online control over speed of the flow in a wind tunnel is carried out. The system provides interactive communication of the experimenter with the operator of the wind tunnel. This equipment allows receiving the information of the non-stationary forces and the moments and their derivatives acting on model, moving in a stream.

**Key words** Aerodynamic measurements, aerodynamic test, measuring system, forces and the moments, non-stationary motion, derivatives forces and the moments

## Введение

При исследовании гидроаэродинамики объектов в большинстве случаев выполняется моделирование стационарных процессов. При этом исследуемый параметр меняется дискретно.

Но реальный объект движется в иных условиях. Движение, чаще всего, неустановившееся и все факторы, воздействующие на объект, изменяются непрерывно.

В этом случае силы, действующие на тело, отличаются от тех, что могут быть получены при изучении установившегося движения. Для моделирования такого движения требуются специальные установки. Они используются в ведущих аэродинамических лабораториях. Подобная установка была разработана и создана в СПбГМТУ. Автором идеи выступил в свое время В.К.Трешков. К сожалению, в то время состояние измерительной техники не позволило получить удовлетворительные результаты, но механическая часть оказалась вполне работоспособной.

На ее основе на кафедре гидроаэростроения и морской акустики СПбГМТУ была модернизирована и доведена до рабочего состояния установка для изучения нестационарных движений (УНД).

### 1. Описание установки

Установка включает смонтированные на общей раме двигатель, редуктор и механизм, обеспечивающий вращение и линейное перемещение модели. Схема установки представлена на рис. 1.

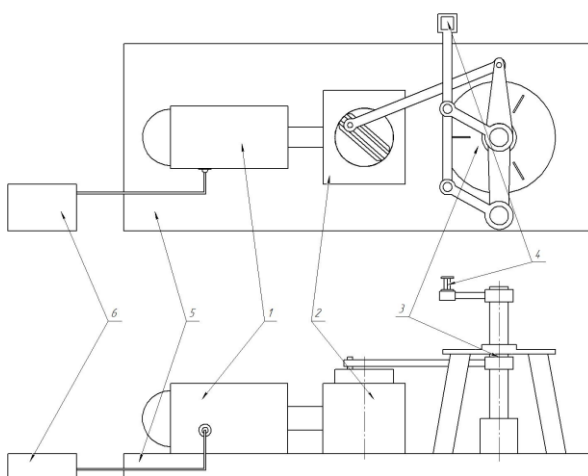


Рис 1. Структурная схема установки для проведения нестационарного эксперимента. Вид в плане и сбоку.

1 – электродвигатель, 2 – редуктор, 3 – качалка, 4 – динамометр, 5 – основание установки, 6 – пульт управления скоростью вращения вала электродвигателя.

Модель устанавливается на одном или нескольких динамометрах, обеспечивающих измерения нужных проекций сил и моментов на модели. В общем случае могут быть измерены все три проекции силы и момента, действующие на модель со стороны набегающего потока.

Кроме того, на установке могут быть смонтированы датчики скорости и давления, что позволяет получать информацию об изменении поля скоростей и давлений в районе размещения модели при ее перемещении.

Управление приводным двигателем УНД осуществляется электронным модулем Vacon [1], позволяющим регулировать обороты от 0 до максимума. В дальнейшем планируется соединить этот блок с компьютером, чтобы управлять частотой колебаний программно.



Рис. 2. Блок управления частотой колебаний

Система измерений обеспечивает преобразование деформации балок динамометра в электрический сигнал, усиление его, оцифровку, предварительную обработку и передачу в базовый компьютер для дальнейшего анализа, графического представления и сохранения на жестком диске.

Одной из серьезных проблем при нестационарных измерениях является частота дискретизации. Т.е. количество измерений за период. Чем выше эта величина, тем достовернее получаемые результаты. Другой стороны, повышение разрядности АЦП, необходимое для повышения точности измерений, требует большего времени на получение и передачу данных. При отладке измерительной системы УНД были испытаны три различных измерительных модуля, разработанные на кафедре ГАММА.

Первый базировался на микропроцессоре MSC1210 Texas Instrument с ядром 8051 [2]. Он включает 24 разрядное АЦП, частота работы процессора 12 МГц. Эта измерительная система давно используется на кафедре для проведения экспериментальных исследований и описана в [3].

Проведенные тестовые исследования и методические эксперименты показали, что схема имеет недостаточную для нестационарных исследований частоту преобразований. При частоте колебаний модели 1.00, 0.67, 0.50, 0.20 Гц за один период колебаний удалось получить только 7, 9, 11 и 17 измерений.

Тогда была испытана измерительная система, основанная на микропроцессоре C8051F060 фирмы Silicon Laboratories [4]. Она тоже имеет встроенный 16 разрядный АЦП. Частота работы микропроцессора - 25 МГц.

С этой установкой были получены лучшие результаты. На той же частоте колебаний удалось обеспечить до 26 измерений за период. Но при этом наблюдалось значительное снижение точности измерений (в два раза) за счет меньшей разрядности используемого АЦП. Главным недостатком этой системы является наличие всего двух измерительных каналов в однофазном включении или одного в дифференциальном режиме. Модуль имеет еще 8 каналов дополнительных АЦП, но с разрядностью всего 10.

В результате была разработана новая, комбинированная система. Она состоит из микропроцессорного модуля C8051F060 фир-

мы SL, который использован как управляющий блок, обеспечивающий получение сигнала. А оцифровка аналогового сигнала выполнялась с помощью отдельного АЦП ADS1280 фирмы Texas Instrument. Это 24 разрядный модуль, позволяющий проводить измерения по 16 одинаковым или 8 дифференциальным каналам.

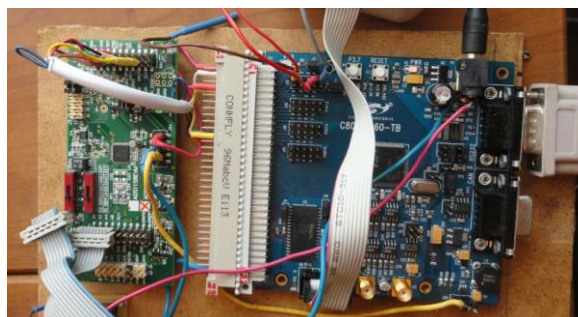


Рис. 3. Макет измерительного модуля и блока управления

Такая связка дала возможность проводить более 250 измерений за период. При этом каждое измерение является осредненным значением из 10 внутренних измерений. Такой подход позволяет повысить достоверность получаемых результатов и, при этом, сократить затраты времени на передачу данных между блоками измерительной системы.

Измерительная система осуществляет непрерывный контроль скорости потока в трубе и изменения внешних условий - температуры и атмосферного давления. Эти величины учитываются программным комплексом при окончательной обработке результатов.

## 2. Обработка измерений

Еще одной проблемой при проведении нестационарных измерений является обработка полученных результатов. Дело в том, что на измеряемую величину накладывается значительный шум, вызванный работой механической части и внешними электронными полями в окружающей среде.

Один из авторов статьи в рамках подготовки своей бакалаврской работы проверил несколько различных способов предварительной обработки.

Для данных нестационарной части эксперимента обработка заключалась в разбиении записи эксперимента на группы, соответствующие различным частотам колебаний. После вычитания «нулевых значений» и умножения на полученный ранее тарировочный коэффициент группы данных подвергались сглаживанию с помощью алгоритма скользящего усреднения. Ширина окна для усреднения подбиралась эмпирически и различалась в зави-

симости от количества зарегистрированных измерений.

Было проведено сравнение такого подхода с результатами работы программы, использующей метод быстрого преобразования Фурье (БПФ), любезно предоставленной Е.Б.Карулиным.

Это сравнение показало возможность использования упрощенных методов для предварительной обработки результатов эксперимента. Но окончательную кривую, естественно, лучше получать с помощью метода быстрого преобразования Фурье (БПФ). Результаты методических экспериментов до и после обработки с помощью БПФ приведены на рис.4-7.

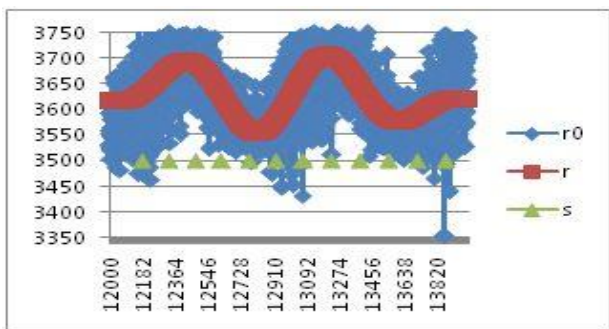


Рис. 4. Частота 0.2 Гц; r0 – исходный сигнал; r – обработанный; s – метки времени

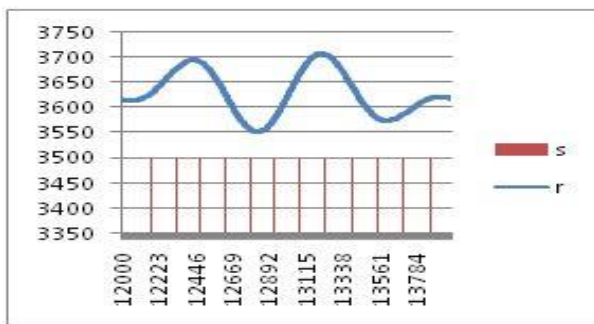


Рис. 5. Частота 0.2 Гц; r – обработанный сигнал; s – метки времени

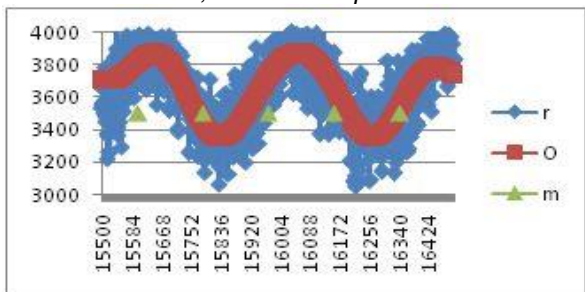


Рис. 6. Частота 0.5 Гц; r – исходный сигнал; o – обработанный; m – метки времени

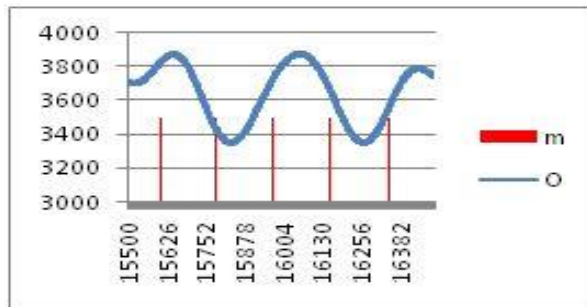


Рис. 7. Частота 0.5 Гц; o – обработанный сигнал; m – метки времени

На рис.8 приведены сравнительные результаты измерений силы на модели при двух различных частотах колебаний – 0.2 и 0.5 Гц. Наглядно видно, как увеличение скорости перемещения модели приводит к росту действующей на нее силы.

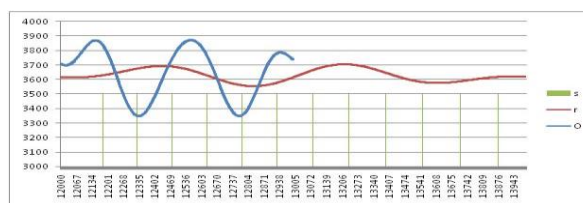


Рис. 8. Сравнение двух частот

Для работы с новым комплексом была написана программа, позволяющая охватить все стадии проведения эксперимента, учет внешних условий: температуры и атмосферного давления, проведение тарировок, для определения передаточных функций динамометров и измерительной системы в целом, выполнения собственно измерений и их обработку.

Некоторые окна, позволяющие получить представления о работе программного комплекса, приведены на рис. 9 и 10

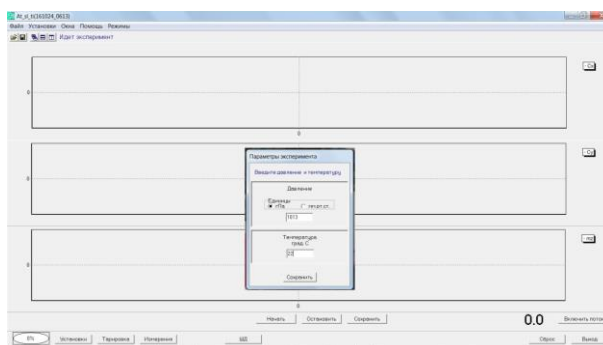


Рис.9. Окно программы перед началом проведения эксперимента





Рис. 10. Результаты измерений. Контроль работы отдельных каналов

Подводя итоги, можно сказать, что на кафедре ГАММА ГМТУ введена в эксплуатацию система, позволяющая проводить изучение нестационарных процессов на объектах, используемых в судостроении и авиации. Данные, которые могут быть получены в процессе таких исследований, могут быть использованы в работе КБ и исследовательских институтов, занимающихся соответствующей тематикой.

### Благодарности

Благодарим сотрудника ЦНИИ им. Крылова Е.Б.Карулина, любезно предоставившего программу, реализующую метод быстрого преобразования Фурье для обработки результатов нестационарного эксперимента.

### Литература

1. Vacon-10-Complete-Manual-DPD01323E1-RU.book 10 с.
2. MSC1210 Evaluation Module, User's Guide. Texas Instruments, Sbau073, 2002. 31 p.
3. Бесядовский А. Р. Система автоматизации процесса измерений в аэродинамической трубе ГМТУ. Морские интеллектуальные технологии, 2015, №1 (27), с. 7-10.
4. C8051F060/1/2/3/4/5/6/7 8K ISP FLASH MCU Family, Silicon Laboratories Inc, 2003. 328 p.

### References

1. Vacon-10-Complete-Manual-DPD01323E1-RU.book 10 p.
2. MSC1210 Evaluation Module, User's Guide. Texas Instruments, Sbau073, 2002. 31 p.
3. Besyadovskiy A. R. (2015). Sistema avtomatizatsii protsessa izmereniy v aerodinamicheskoy trube GMTU. Morskie intellektual'nye tekhnologii, 1 (27), 7-10.
4. C8051F060/1/2/3/4/5/6/7 8K ISP FLASH MCU Family, Silicon Laboratories Inc, 2003. 328 p.

УДК 004.942:004.031.043

## КОНТРОЛЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ В УСЛОВИЯХ АДАПТАЦИИ И САМООРГАНИЗАЦИИ АВАРИЙНОГО СУДНА НА НЕРЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

**Нечаев Юрий Иванович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и информационных технологий

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, Лоцманская, 3

**Петров Олег Николаевич**

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 вопросы моделирования динамики аварийного судна в нестационарной динамической среде. Экстремальные ситуации моделируются на основе динамической теории катастроф. Процесс эволюции представлен в виде движения системы к целевому аттрактору и при потере устойчивости. В настоящем исследовании сформулированы концептуальные основы организации системы реального времени. Разработанный алгоритм и программный комплекс позволяют моделировать сложные процессы взаимодействия аварийного судна в условиях адаптации и самоорганизации. Цель исследования – построение и использование моделей катастроф нестационарных динамических систем, интегрирующих классические и нейросетевые модели на основе интеллектуальных технологий XXI века. Особое внимание обращается на реализацию технологии моделирования процессов возникновения «потенциальной ямы» при различном уровне внешних возмущений. На основе концептуальных решений разработан математический аппарат геометрической и аналитической интерпретации текущих ситуаций при комплексном использовании достижений современной компьютерной математики и средств высокопроизводительных вычислений.

**Ключевые слова:** современная теория катастроф, динамическая непотопляемость, самоорганизация, нерегулярное волнение, потенциальная яма, нейросетевое моделирование, эволюционная динамика, адаптивный резонанс.

## DYNAMIC UNSINKABILITY CONTROL DURING ADAPTATION AND SELF-ORGANIZATION OF DAMAGED SHIP ON IRREGULAR WAVES

**Nechaev Yuri Ivanovich**

the professor, Dr.Sci.Tech, the professor of DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE, STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation

**Petrov Oleg Nikolaevich**

the associate professor, Ph.D., the associate professor of DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE  
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: petr\_oleg@mail.ru

### Abstract

Modelling of damaged ship dynamics in non-stationary environment is discussed. Extreme situations are modelled on the basis of dynamic catastrophe theory. Evolutionary process is described as

system motion to target attractor and in case of stability loss. Conceptual basics of real-time system organization are formulated. The developed algorithm and software are used to model complex interaction of damaged ship with the environment during adaptation and self-organization. The purpose of study is to develop catastrophe models of non-stationary dynamic systems that integrate classic and neural models on the basis of intellectual technologies of XXI century. Special attention is given to the realization of potential well modelling in different emergency situations. The geometrical and analytical interpretations of current situation are developed on the basis of conceptual solutions using the achievements of modern computer mathematics and high-performance computing.

**Key words:** modern catastrophe theory, dynamic unsinkability, self-organization, irregular waves, potential well, neural modelling, evolutionary dynamics, adaptive resonance.

### Введение

При создании математического обеспечения бортовой интеллектуальной системы (ИС) контроля динамической непотопляемости морских судов разрабатываются и «проигрываются» различные сценарии развития эволюционной динамики экстренных вычислений [1] – [8]. Экстремальные ситуации моделируются на основе динамической теории катастроф, позволяющей представить процесс эволюции в виде движения системы к целевому аттрактору и при потере устойчивости (возникновение катастрофы). В настоящем исследовании сформулированы концептуальные основы организации системы реального времени. Функционируя в рамках принципа конкуренции, разработанная вычислительная технология обеспечивает непрерывный контроль динамики аварийного судна как нелинейной нестационарной системы в окрестности «потенциальной ямы». В качестве практического приложения рассмотрена эволюционная динамика аварийного судна в условиях нерегулярного волнения. Дается содержательная постановка задачи построения программного комплекса динамической базы знаний ИС на основе теории многофункциональных систем [6].

Большое внимание уделяется использованию нейросетевых моделей при интерпретации динамических ситуации в непрерывно изменяющейся нестационарной среде [4]. При изложении результатов моделирования авторы обращают внимание на следующее *принципиальное отличие* нового подхода: методы и модели динамической теории катастроф рассматриваются в тесной связи с интеллектуальными технологиями, реализуемыми в бортовых ИС новых поколений; геометрическая интерпретация ситуаций осуществляется совместно с аналитическими методами.

Т. о., цель исследования – построение и использование моделей катастроф нестационарных динамических систем (NN-систем), интегрирующих классические и нейросетевые модели на основе интеллектуальных технологий XXI века.

### 1. Теоретический базис исследования

Нейросетевое моделирование эволюционной динамики NN-системы методами динамической теории катастроф реализуется под управлением нечеткой формальной системы (НФС). В процессе функционирования НФС осуществляются процедуры преобразования информации в простран-

ствах поведения и управления. Циклы выполнения этих процедур включают идентификацию, аппроксимацию и прогноз развития аварийной ситуации на основе множества альтернатив. Генерация сценариев развития ситуации, анализ альтернатив и оценка информационной эффективности решения производятся на основе данных моделирования динамических ситуаций при формировании «потенциальной ямы» в зависимости от действующих внешних возмущений [4].

Кодирование каждой ситуации производилось с помощью вектора  $S = (S_1, \dots, S_u)$  в  $u$ -мерном пространстве. Каждой точке  $S_j$  этого пространства соответствует лучший алгоритм  $A_j$ , определяемый

$$R(A_j, S_j) = \min_{j=1, \dots, q} R(A_j, S_j) \quad (1)$$

Распознавание ситуации ведется на основе процедуры нейроидентификации с использованием конечной обучающей выборки  $\langle S_j, A_j \rangle$  ( $j = 1, \dots, N$ ), элементы которой получены путем решения оптимизационной задачи

$$R(A, S_j) \rightarrow \min_{A_1, \dots, A_q} \Rightarrow A_j, \quad (2)$$

где  $S_j$  ( $j = 1, \dots, N$ ) – ситуации, представляющие различные части пространства  $\{S\}$ .

В процессе интерпретации ситуации на интервале  $[t_0, t_k]$  при выполнении первого события реализуется правило  $P_1$ , которому соответствует алгоритм  $A_1$  и т. д. В результате формируется последовательность:

$$\langle P_1, \dots, P_N; A_1, \dots, A_N \rangle. \quad (3)$$

Процесс моделирования динамики взаимодействия осуществляется в виде упорядоченных правил и алгоритмов, с помощью которых обеспечивается оперативный контроль эволюции в сложной динамической среде. Результаты моделирования отображаются в виде НФС (рис. 1).

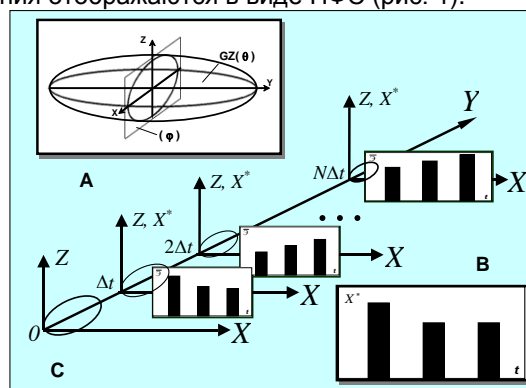


Рис. 1. Система реального времени, отображающая эволюционную динамику аварийного судна

Как следует из рис. 1, последовательность операций алгоритма предусматривает процедуры преобразования фрактальных отображений на интервале реализации  $[t_0, t_k]$ : А – общая фрактальная структура эллиптической модели; В – структура управляющих воздействий  $X^*$  в виде прямоугольников в плоскости XZ; С – временная последовательность  $(\Delta t, 2\Delta t, \dots, N\Delta t)$ , отображающая изменение функции интерпретации  $GZ(\theta, t)$  в плоскости YZ и уровень интеллектуальной поддержки в плоскости XZ, а символы 1, 2, ..., N фиксируют текущее время развития ситуации на интервале реализации. Если используется пространственная реализация функции  $GZ(\theta, \varphi, t)$ , то по оси X принимают курсовой угол  $\varphi$ , а вдоль оси Y последовательность эллипсоидов, отображающих эволюцию системы.

Область  $\Omega$  формирования фрактальной структуры  $\Phi$  определяется как множество состояний системы «судно – внешняя среда» на интервале реализации  $[t_0, t_k]$ :

$$\Omega: \Phi_0 \rightarrow \Phi_k, \tag{4}$$

где  $\Phi_0$  и  $\Phi_N$  – начальное и конечное состояния фрактальной структуры, определяющие следующие условия:

$$\Phi_N = \text{Stab}(\text{Attr}), \Phi_N = \text{Cap}(\text{Attr}), \tag{5}$$

где  $\text{Stab}(\text{Attr}), \text{Cap}(\text{Attr})$  – области притяжения аттрактора в случае стабильного состояния системы и возникновения катастрофы.

Типичными аттракторами динамики взаимодействия является устойчивый и неустойчивый предельные циклы, формируемые в зависимости от особенностей динамики судна на интервале реализации. Выработка управляющих воздействий по стабилизации ситуации осуществляется на основе механизма логического вывода НФС. Структура управления предусматривает использование различных стратегий в зависимости от сложности ситуации, включая программное и адаптивное управление с помощью параметрической настройки системы и управление на основе принципа самообучения с использованием текущей и накопленной информации о динамике взаимодействия в нестандартных (нештатных и экстремальных) ситуациях.

## 2. Интерпретация динамики «потенциальной ямы» в процессе эволюции NN-системы

Рассмотрим динамику аварийного судна в процессе развития ситуации на основе развития подхода [3]. В момент возникновения аварии движение судна можно рассматривать как случай возникновения «потенциальной ямы» (рис. 2а), где потенциал  $V(\theta)$  связан с внешним возмущением  $M_0$  соотношением  $M_0 = -dV/d\theta$  или  $V = \frac{1}{2} a\theta^2$ . В случае линейной системы существует одно стационарное состояние  $d\theta/dt=0, \theta=0$  и оно устойчиво. Предположим теперь, что восстанавливающий момент описывается нелинейной функцией. Уравнение движения принимает вид

$$\theta = -a\theta^2 - \beta\theta^3, \tag{6}$$

где  $\beta > 0$ . При этом «потенциальная яма» описывается выражением

$$V(\theta) = 1/2 a\theta^2 + 1/2 \beta\theta^4, \tag{7}$$

Исследование предполагает два случая: а)  $a > 0, \beta > 0$ . В этом случае форма нового потенциала остается прежней, и единственное стационарное решение, которое устойчиво, есть точка  $\theta = 0$ ; б)  $a \leq 0, \beta > 0$ . При переходе через критическое значение  $a_c = 0$  форма потенциала изменяется, хотя остается симметричной (рис. 1б). Потенциал

$$V(\theta) = a\theta^2 + 3/4 \beta/4, \tag{8}$$

при  $a > 0$  (сплошная линия) и при  $a < 0$  (пунктир). Теперь число стационарных решений равно трем: все три корня уравнения

$$a\theta^2 + \beta\theta^3 = 0 \tag{9}$$

при  $a < 0, \beta > 0$  действительны. Но прежнее симметричное устойчивое стационарное состояние  $\theta = 0$  становится неустойчивым и система переваливается в одно из равновесных состояний

$$\theta = (|a|/\beta)^{1/2}, \theta = -(|a|/\beta)^{1/2}, \tag{10}$$

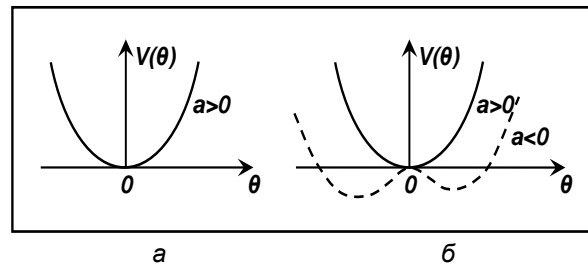


Рис. 2. «Потенциальная яма» в задаче эволюционной динамики аварийного судна

Результаты анализа показывают, что для возникновения неопределенности относительно следующего состояния совсем не обязательно иметь большее число степеней свободы: одной лишь неустойчивости достаточно, чтобы породить – через бифуркацию – непредсказуемое поведение, которое принято связывать со стохастичностью.

Результаты нейросетевого моделирования представлялись для случаев формирования целевого аттрактора и потери устойчивости движения (возникновение катастрофы). Первая нейронная сеть имела на выходе четыре нейрона ( $X_1 - X_4$ ) и восстанавливала параметры взаимодействия в случае пульсирующей «потенциальной ямы». Вторая нейронная сеть с двумя нейронами ( $X_1, X_2$ ) на выходе отображала ситуацию возникновения глубокой «потенциальной ямы» при интенсивных внешних воздействиях. Факторы  $X_1 - X_4$  характеризовали равновесные параметры взаимодействия, а факторы  $X_1, X_2$  – снижение метacentрической высоты и предельные значения углов крена. Последовательность итерационных процедур определяла пространства поведения и управления для различных фаз развития динамических ситуаций на интервале реализации  $[t_0, t_k]$ .

Результаты нейропрогноза развития ситуаций при заданном уровне внешних возмущений представлялись в виде факторов  $X_1 - X_3$ , обозначаю-

щих ситуации, и функций  $\Phi_1, \dots, \Phi_7$ , характеризующих результаты нейросетевого моделирования, обеспечивающего прогноз на интервале  $[t_0, t_k]$ .

### 3. Синергетическое управление в условиях самоорганизации

При разработке систем поддержки управленческих решений в практических приложениях, связанных с контролем динамики аварийного судна в чрезвычайных ситуациях используются результаты анализа самоорганизующихся систем. Отображение особенностей функционирования реализуется на основе программного комплекса ИС с помощью *самоорганизующихся структур* динамической модели катастроф и фрактальных отображений [3]. Концепция таких структур, ее перестройки во времени и пространстве реализуются в рамках синергетической парадигмы [4] в зависимости от состояния судна как NN-системы и действующих возмущений.

Понятие перестройки структуры NN-системы в процессе самоорганизации на основе функционирования адаптивной компоненты ИС связывается с построением векторных подпространств  $W_j(t)$  и  $V_j(t)$  общего пространства взаимодействия  $\Omega(W_j, V_j)$ :

$$\Omega_j(W_j, V_j) = \{W_j(t), V_j(t)\}, \quad (11)$$

где  $W_j(t)$  и  $V_j(t)$  – подпространства, определяющие динамику судна и внешней среды.

Обозначая размерности пространств

$$\dim W_j(t) = S_1, \dim V_j(t) = S_2,$$

имеем

$$S_1 + S_2 \geq n \quad (12)$$

При выполнении неравенства (12) подпространства  $W_j(t)$  и  $V_j(t)$  пересекаются при наименьшей возможной размерности:

$$\max(0, S_1 + S_2 - n). \quad (13)$$

В процессе функционирования вычислительный комплекс осуществляет сложное преобразование информации путем генерации ансамбля траекторий динамической модели катастроф в рамках концепции экстренных вычислений. Для начального состояния системы и заданных ограничений на допустимые значения исследуемой величины  $x(0) \in X(0)$  (где  $X(0)$  – заданное множество) в каждый момент времени  $t$  рассматривается множество

$$\begin{aligned} X(t, u(\bullet)) &= X(t, u(\bullet), X(0)) = \\ &= U\{x(t, u(\bullet), x(0) | x(0) \in X(0)\}, \end{aligned} \quad (14)$$

объединяющее все траектории NN-системы при управлении  $u=u(t)$  и векторах  $x^0 \in X^0$ .

Таким образом, имеем ансамбль траекторий

$$X(t, u(\bullet)), t_0 \leq t \leq t_k \quad (15)$$

порожденных множеством  $X^0$  и управлением  $u(\bullet)$  при заданном возмущении  $w(t)$ . Выбирая функцию  $u(t)$ , можно управлять множеством ансамбля в пространстве управления динамической теории катастроф. Цель управления на интервале реализации  $[t_0, t_k]$  заключается в том, чтобы в заданный

момент времени привести ансамбль  $X(t, u(\bullet))$  в заданную  $\varepsilon$ -окрестность, а требование оптимальности состоит в том, чтобы величина была минимальной.

Теоретический базис операций (11) – (15) процесса самоорганизации реализуется в рамках фундаментальной теоремы динамической теории катастроф [3] на основе исследований [4] – [8]. В результате происходит интеграция перестроенных элементов системы контроля в целостное образование более высокого уровня, что реализуется в виде более сложных процессов интерпретации поведения и управления в интегрированной вычислительной среде ИС с новыми качествами. Эволюционная стратегия самоорганизующейся среды способствуют углублению знаний и их практическому использованию при контроле чрезвычайных ситуаций.

В программном комплексе ИС реализуются три основных типа самоорганизации: структурная, параметрическая, функциональная. Ниже дается общая характеристика моделей самоорганизации при анализе динамических сцен и формализации знаний в процессе эволюции судна в сложной динамической среде.

#### 3.1. Структурная самоорганизация

В основу структурной самоорганизации принят подход [4], предполагающий замену элементов структурной схемы в процессе функционирования системы. Перестройка структуры системы в процессе самоорганизации обеспечивается управляющим модулем, позволяющим регулировать исходную структуру в зависимости от текущей динамической ситуации. Дерево решений формируется за счет последовательной декомпозиции подсистем, а модель иерархической структуры представляет собой совокупность моделей подуровней, связанных древовидным отношением [3]:

$$M = \langle M^{sl}, R^T \rangle, \quad (16)$$

где  $M^{sl} = \{M^{sl}(S_i)\}$  – модель подуровня (sublevel), порожденного подсистемой  $S_i$ ;  $R^T \in M^{sl}$  – древовидное отношение.

Применительно к рассмотренной схеме модель структурной самоорганизации ИНС связана с изменением числа скрытых слоев и числа нейронов в слоях, а также при переходе к другой архитектуре сети в соответствии с концептуальными решениями, определяемыми динамической моделью катастроф [4]. Типичными конфигурациями ИНС являются многослойные сети прямого распространения, нейросетевые ансамбли и интегрированные нейронные сети [2].

В процессе структурной самоорганизации один тип элементов системы заменяется другим типом. Стратегия самоорганизации программного комплекса UCS предусматривает замену функций управления. Формально корневой элемент системы в зависимости от особенностей динамической среды реализует выходную функцию  $\Phi(\text{Out})_{j,i} \in \Phi(\text{Out})_i$ , где  $\Phi(\text{Out})_i$  – набор функций, реализуемых элементом типа  $i$ :

$$\Phi(Out)_i = \left\{ \begin{array}{l} \Phi(Out)_{li}, \\ \Phi(Out)_{2i}, \dots, \Phi(Out)_{mi} \end{array} \right\}, \quad (17)$$

где  $m$  – число различных функций, которые может реализовать элемент типа  $i$ . Каждая функция  $\Phi(Out)_{ji}$ , зависит от набора параметров

$$\Pi(Out)_{ji} = \left\{ \begin{array}{l} \Pi(Out)_{li}, \\ \Pi(Out)_{2i}, \dots, \Pi(Out)_{ni} \end{array} \right\}, \quad (18)$$

характеризующих элемент типа  $i$ .

### 3.2. Параметрическая самоорганизация

Параметрическая самоорганизация может быть осуществлена в рамках подхода к нелинейной самоорганизации сложных динамических систем [4]. В основу этого подхода положен принцип адаптивного резонанса, используемый в теории ИНС. В процессе функционирования осуществляется непрерывный контроль текущей ситуации с помощью нечеткой логической системы. Самоорганизация системы основана на подстройке (а в сложных случаях и перестройке) параметров моделей логической системы. В результате преобразования информации устанавливаются значения параметров управления, при которых целевой функционал будет максимальным.

Формируемые на основе подхода [3] свойства динамической базы знаний наиболее четко проявляются при обеспечении функционирования в задачах интерпретации объектов ИС в условиях неопределенности и неполноты исходной информации. Важной особенностью нечеткой системы знаний являются: возможность сохранения *свойства пластичности* при запоминании новой информации; предотвращение *модификации* исходной базы знаний за счет формирования новых правил, описывающих нестандартную ситуацию.

При функционировании в режиме экстренных вычислений происходит накопление новой информации и корректировка базы знаний. Динамическая база знаний совершенствуется и расширяется за счет включения новых моделей. Подобно нейронной сети ART [1], база знаний имеет *внутренний детектор новизны* – тест на сравнение предъявленной нестандартной ситуации с содержимым ансамбля логических правил.

При реализации механизма логического вывода новый образ, предъявленный на основе поступившей информации, классифицируется с одновременной уточняющей модификацией процедур, определяющих условную часть логического правила. Такую ситуацию можно интерпретировать как возникновение *адаптивного резонанса* в динамической базе знаний в ответ на предъявление образа. Если резонанс не возникает в пределах некоторого заданного порогового уровня, то успешным считается тест новизны, и образ воспринимается системой как новый.

Модификация логических правил, не испытавших резонанса, при этом не производится. Запомненный образ нестандартной ситуации не будет изменяться, если текущая входная информация не окажется достаточно похожим на него. Таким

образом, решается проблема стабильности-пластичности. Новый образ, описывающий нестандартную ситуацию, может порождать создание новых классов таких ситуаций, однако при этом существующая база знаний не разрушается.

Применительно к используемым нейросетевым структурам параметрическая самоорганизация связана с перестройкой системы синоптических связей ИНС в соответствии с функцией интерпретации, которая модифицируется за счет параметрической настройки сетевой структуры.

Формирование управляющих сигналов реализуется в процессе модификации нечетких правил динамической базы знаний и настройки параметров ФП наблюдаемых и управляемых переменных. Управление организуется на основе принципа конкуренции с использованием методов классической математики, нечеткой логики, нейро-нечетких и нейро-эволюционных моделей.

### 3.3. Функциональная самоорганизация

Этот тип самоорганизации может быть организован на основе обработки информации, накопленной в процессе практических наблюдений. Значение целевого функционала управления объектами ИС улучшается с помощью подбора необходимой функции из множества функций для возможных ситуаций-прецедентов среды взаимодействия данного типа. Реализация этой стратегии осуществляется на основе нечеткого логического вывода по прецеденту [3], обеспечивающего вычисление отклонения между откликом исследуемой модели и эталонным откликом.

## 4. Интерпретация результатов функционирования ИС в условиях самоорганизации

При оценке риска, связанного с построением сценариев взаимодействия объектов самоорганизации при интерпретации текущей ситуации рассматривают текущее, начальное и конечное состояния системы [4]. Начальное состояние соответствует моменту реализации принятого решения (альтернативы), а конечное – состоянию, которое приобретает в результате управляющих воздействий. Эти данные позволяют на заданном интервале времени  $[t_0, t_k]$  определить решение задачи самоорганизации. Анализ ведется в реальном масштабе времени с использованием методов моделирования на основе динамической теории катастроф. Функция рассогласования, определяющая качество работы ИС при реализации коллективной стратегии, может быть построена на основе функции выбора, метода эталонов и критерия в рамках нечеткого логического базиса.

В качестве примеров практической реализации разработанной стратегии и концептуальных решений построения самоорганизующихся систем рассмотрим эволюцию судна для случаев взаимодействия, связанных с перестройкой динамической картины поведения судна при непрерывном изменении параметров судна и внешней среды (рис. 3-4). Характерные точки катастрофы на этих

рисунках – центр масс  $G$ , кривая центров величины  $C(\theta)$ , метацентр  $m_0$ , точка сборки  $P$  и область бифуркационного множества  $B(\theta)$  – изменяют свое положение в процессе структурной и параметрической самоорганизации. Затененная область  $GZ_0(\theta)$  соответствует изменению восстанавливающего момента  $M(\theta)$ , который создается за счет положительной величины метацентрической высоты.

Случай взаимодействия, приведенный на рис. 3, отображает результат преобразования динамической картины катастрофы на основе структурной и параметрической самоорганизации. Исходная модель взаимодействия соответствует формированию первого классического случая затопления  $S_1$  (симметричное затопление) и перехода системы в новый режим  $S_3$  вследствие интенсивного затопления отсеков судна на нерегулярном волнении. При этом происходит резкое снижение метацентрической высоты и переход системы в область их отрицательных значений (пример формирования аттрактора бистабильной динамической системы [4]).

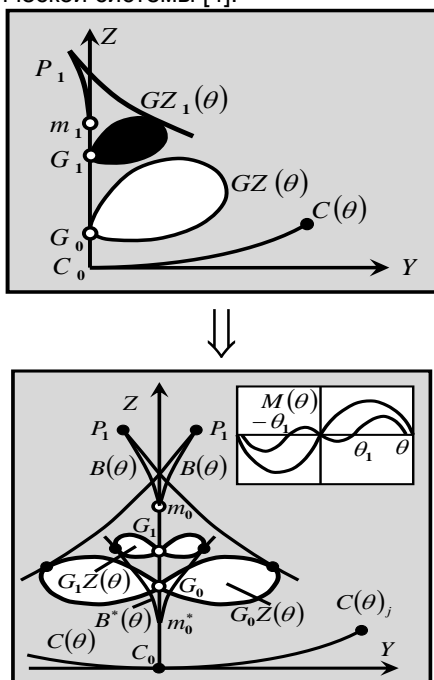


Рис. 3. Перестройка модели катастроф  $S_1 \Rightarrow S_3$  при симметричном затоплении отсеков поврежденного судна

Динамические картины взаимодействия на рис. 4 отображают результат структурной и параметрической самоорганизации при асимметричном затоплении отсеков поврежденного судна [3].

Модель катастрофы характеризует формирование второго классического случая затопления  $S_2$  и переход системы в новый аттрактор, соответствующий более сложному режиму  $S_4$  вследствие снижения метацентрической высоты до области отрицательных значений за счет влияния влившейся воды и воздействия нерегулярного волнения.

Адаптируемое программное обеспечение (adaptable software) ИС контроля динамической непотопляемости [1], [3] связано с развитием следующих подходов: *параметрическая адаптация* предполагает изменение во времени алгоритмов функционирования; *алгоритмическая адаптация* основана на переключении с одного алгоритма на другой; *ресурсная адаптация* сводится к более эффективному использованию ресурсов распределенных систем (перемещение исполняемых кодов на менее нагруженные процессоры или серверы и др.). Все эти подходы сводятся к совершенствованию приемов программирования на основе опыта создания адаптируемых систем, накопленного в различных областях практических приложений.

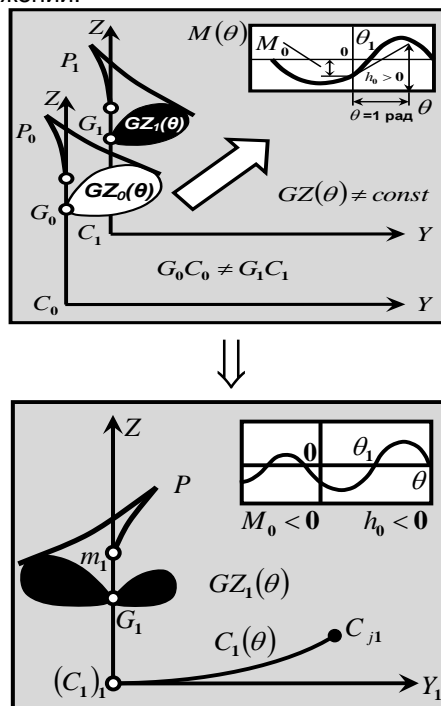


Рис. 4. Перестройка модели катастроф  $S_2 \Rightarrow S_4$  при асимметричном затоплении отсеков поврежденного судна

Рассмотренные предельные случаи нештатных ситуаций при интенсивных внешних воздействиях связаны с возникновением пульсирующей «потенциальной ямы» и катастрофических ситуаций, приводящих к потере устойчивости движения. При функционировании программного комплекса экстренных вычислений возможность наступления таких ситуаций предусматривается за счет формализации процедурной компоненты динамической базы знаний. Для этого разрабатываются модели прогноза развития экстремальных и нештатных ситуаций, которые обрабатываются в процессе тестирования программного комплекса бортовой ИС на основе построения сценариев динамики взаимодействия судна с внешней средой и анализа альтернативных решений.

### Заключение

Таким образом, проблема самоорганизации в задачах исследования процессов взаимодействия судна с внешней средой рассматривается в рамках функционирования АДС [6]. Сложность динамической среды порождает разнообразие динамических картин взаимодействия в непрерывно изменяющейся внешней среде. В этих условиях на первый план выдвигаются проблема построения моделей эволюции и самоорганизации исследуемой системы в условиях неопределенности и неполноты исходной информации. Рассмотренный подход к структурной, параметрической и функциональной самоорганизации позволяет формализовать задачу интерпретации и построить итерационный алгоритм, обеспечивающий решение проблемы выбора оптимальной структуры с учетом наложенных ограничений. Другая проблема связана с реализацией математического описания, соответствующего динамике самоорганизующейся системы в условиях возникновения пульсирующей «потенциальной ямы».

Оптимальная структура алгоритмов самоорганизации может быть построена на основе принципа сложности и метода минимальной длины описания, а программная реализация осуществлена в режиме реального времени на основе параллельных вычислений в рамках «облачной» модели и Грид-технологий [4].

В процессе выполненных исследований взаимодействия аварийного судна с внешней средой

позволяет сделать следующие выводы:

- выделены направления использования нейросетевых моделей, наиболее полно отражающих особенности динамики NN-системы при формировании «потенциальной ямы» в процессе эволюции системы в условиях непрерывного изменения динамики судна и внешней среды;
- разработаны модели приложения концепции динамической теории катастроф при интерпретации динамики аварийного судна при различном уровне внешних возмущений.
- сформулированы принципы исследования моделей взаимодействия, на базе которых формируется информационный предиктор в задачах прогнозирования сложных ситуаций с использованием нейросетевых моделей при контроле динамики систем, функционирующих в условиях неопределенности и неполноты исходной информации в нестационарной среде.

На основе концептуальных решений разработан математический аппарат геометрической и аналитической интерпретации текущих ситуаций при комплексном использовании достижений современной компьютерной математики и средств высокопроизводительных вычислений. В рамках такой формализации открываются возможности анализа и прогноза развития сложных динамических ситуаций при взаимодействии аварийного судна с внешней средой.

### Литература

1. Нейрокомпьютеры в интеллектуальных технологиях XXI века: монография / под общей редакцией Ю. И. Нечаева. – М.: Радиотехника, 2012. – 352 с.
2. Нечаев, Ю. И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений: монография / Ю. И. Нечаев. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. – 392 с.
3. 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.
4. Нечаев, Ю. И. Топология нелинейных нестационарных систем: теория и приложения: монография / Ю. И. Нечаев. – Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2015. – 332 с.
5. Николис, Дж. Динамика иерархических систем: эволюционное представление / Дж. Николис. – М.: Мир, 1989.
6. Новиков, Д.А. Курс теории активных систем / Д. А. Новиков, С. Н. Петраков. – М.: СИНЕГ, 1999.
7. Lublinsky, V. Defining SOA as an architectural style [Электронный ресурс] / V. Lublinsky. – 2007. – Режим доступа: <http://www.ibm.com/developerworks/architecture/library/ar-soastyle/>
8. 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. Neyrokompyutery v intellektual'nykh tekhnologiyakh XXI veka: monografiya / pod obshchey redaktsiey Yu. I. Nechaeva [Neural computers in intellectual technologies of XXI century]. Moscow, Radiotec Publ., 2012.
2. 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.
3. 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.
4. 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.



- 
5. Nikolis Dzh. Dinamika ierarkhicheskikh sistem: evolyutsionnoe predstavlenie [The dynamics of hierarchical systems]. Moscow, World Publ., 1989.
  6. Novikov D.A., Petrakov S. N. Kurs teorii aktivnykh sistem [The course of active system theory]. Moscow, SINEG Publ., 1999.
  7. Lublinsky B. Defining SOA as an architectural style. 2007.  
<http://www.ibm.com/developerworks/architecture/library/ar-soastyle/>
  8. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago. April 25-26, 2007.  
<http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.

УДК 629.12.073.243.4

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СИЛ ВТОРОГО ПОРЯДКА , ОБУСЛОВЛЕННЫХ СУММОЙ ЧАСТОТ , ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ИЗОЛИРОВАННЫХ ПОПЕРЕЧНО-ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ, ВЕРТИКАЛЬНЫХ ,БОРТОВЫХ КОЛЕБАНИЯХ КОНТУРА И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

**Семенова Виктория Юрьевна**

Д.т.н., профессор, профессор кафедры теории корабля  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
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 нелинейных сил второго порядка, обусловленных суммой частот и возникающих при различных видах колебаний контура и их взаимодействии в условии жидкости бесконечной глубины. Используемый расчетный метод представляет собой комбинированный метод интегральных уравнений Гельмгольца. Данный метод позволяет избежать негативного влияния «нерегулярных частот», характерного при использовании классического метода интегральных уравнений. Результаты расчетов, полученные авторами, сопоставляются с результатами расчетов, полученными по другому методу. Показано убедительное согласование результатов между собой для разных типов контуров. Приводятся результаты исследования влияния на нелинейные силы геометрических параметров контуров, таких как коэффициента полноты и отношения осадки к полуширине. Показано значительное увеличение нелинейных вертикальных сил при уменьшении коэффициента полноты и отношения осадки к полуширине и горизонтальных сил при увеличении коэффициента полноты и отношения осадки к полуширине. Делается вывод о необходимости учета всех составляющих нелинейных сил при построении методов расчета качки судна на нерегулярном волнении.

**Ключевые слова** : нелинейные силы второго порядка, метод интегральных уравнений, условие на свободной поверхности, сумма частот, потенциал, функция Грина, взаимодействие колебаний, нерегулярные частоты.

## THE DETERMINATION OF NONLINEAR FORCES OF THE SECOND ORDER DUE TO THE SUM OF FREQUENCIES DURING THE SWAY, HEAV AND ROLL OF A TWO-DIMENSIONAL BODY AND THEIR INTERACTION

**Semenova Viktoriya Yur'evna**

Dr.Sci.Tech., the professor, the professor 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 non-linear second-order forces due to the sum of frequencies which arise during the sway, heave and roll and their interaction of a two-dimensional body in deep water. The calculation method used is a combined method of Helmholtz integral equations. This method allows to avoid the negative impact of "irregular frequencies" that are typical when using the classical method of integral equations. The calculation results obtained by the authors, are compared with the calculation results obtained by another method. Shown convincing correlation of results between them. The results of the study of the influence of the geometric parameters on nonlinear forces, such as the coefficient of sectional area and the ratio of the draft to half-beam are presented. Obtained results show a significant increasing of nonlinear vertical forces with the decreasing of the sectional area's coefficient and the ratio of the draft to half-beam and increasing of nonlinear horizontal forces with the increasing of the sectional area's coefficient and the ratio of the draft to half-beam depth. The conclusion about the necessity of taking into account all components of nonlinear forces in the elaboration of the methods of calculation of the motions of the ship on an irregular waves is made.

**Key words:** nonlinear forces of the second order, method of integral equations, non-linear boundary condition at the free surface of the liquid, the sum of frequencies, potential, function of Green, interaction of motions, irregular frequencies.

**Введение**

Нелинейные волновые силы второго порядка состоят из нелинейных сил, обусловленных разностью частот и нелинейных сил, обусловленных суммой частот. В работах авторов [1],[3],[4] было последовательно рассмотрено определение всех составляющих нелинейных сил, обусловленных разностью частот, а именно: дифракционных сил, сил, возникающих при вертикальных, поперечно-горизонтальных, бортовых колебаниях контуров и их взаимодействии и нелинейных сил, возникающих при взаимодействии отдельных видов колебаний с набегающим и дифрагированным волнением.

Настоящая статья открывает серию работ, посвященных определению отдельных категорий нелинейных сил, обусловленных суммой частот и рассматривает метод расчета сил, возникающих при изолированных вертикальных, поперечно-горизонтальных, бортовых колебаниях шпангоутных контуров и их взаимодействии.

**1. Описание метода расчета**

Предположим, что шпангоутный контур заданной формы совершает вынужденные, гармонические поперечно-горизонтальные (ПГК), вертикальные (ВК) и бортовые (БК) колебания в жидкости безграничной глубины. Будем считать, что движение контура во времени происходит по следующим законам:

$$\begin{aligned} \eta_g(t) &= \eta_{m1} e^{-j\omega_1 t} + \eta_{m2} e^{-j\omega_2 t}; \\ \zeta_g(t) &= \zeta_{m1} e^{-j\omega_1 t} + \zeta_{m2} e^{-j\omega_2 t}; \\ \theta(t) &= \theta_{m1} e^{-j\omega_1 t} + \theta_{m2} e^{-j\omega_2 t} \end{aligned} \quad (1)$$

Используя метод малого параметра [2], потенциал скорости движения жидкости

второго порядка, обусловленный суммой частот, будет иметь вид:

$$\Phi^{(2)} = (\phi_{22}^{(2)} + \phi_{33}^{(2)} + \phi_{44}^{(2)} + \phi_{23}^{(2)} + \phi_{24}^{(2)} + \phi_{34}^{(2)}) e^{-j(\omega_1 + \omega_2)t}, \quad (2)$$

где  $\phi_{22}^{(2)}, \phi_{33}^{(2)}, \phi_{44}^{(2)}$  потенциалы второго порядка, обусловленные изолированными видами колебаний;  $\phi_{23}^{(2)}, \phi_{34}^{(2)}, \phi_{24}^{(2)}$  - потенциалы, обусловленные взаимодействием ПГК, ВК и БК.

Кроме уравнения Лапласа, принципа излучения и условия на бесконечной глубине, данные потенциалы должны удовлетворять граничным условиям непротекания на контуре:

$$\frac{\partial \phi_{33}^{(2)}}{\partial n} = -\frac{j}{2} \frac{\partial^2 \phi_{32}^{(1)}}{\partial s \partial \eta} - \frac{j}{2} \frac{\partial^2 \phi_{31}^{(1)}}{\partial s \partial \eta}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi_{22}^{(2)}}{\partial n} = \frac{j}{2} \frac{\partial^2 \phi_{22}^{(1)}}{\partial s \partial \zeta} + \frac{j}{2} \frac{\partial^2 \phi_{21}^{(1)}}{\partial s \partial \zeta}; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_{44}^{(2)}}{\partial n} &= -\frac{j}{2} \left\{ \frac{\partial \phi_{42}^{(1)}}{\partial s} + \eta \frac{\partial^2 \phi_{42}^{(1)}}{\partial s \partial \eta} + \zeta \frac{\partial^2 \phi_{42}^{(1)}}{\partial s \partial \zeta} \right\} - \\ &- \frac{j}{2} \left\{ \frac{\partial \phi_{41}^{(1)}}{\partial s} + \eta \frac{\partial^2 \phi_{41}^{(1)}}{\partial s \partial \eta} + \zeta \frac{\partial^2 \phi_{41}^{(1)}}{\partial s \partial \zeta} \right\}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_{23}^{(2)}}{\partial n} &= \frac{j}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \phi_{32}^{(1)}}{\partial \zeta} - \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \phi_{22}^{(1)}}{\partial \eta} \right] + \\ &+ \frac{j}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \zeta} - \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \eta} \right]; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi_{24}^{(2)}}{\partial n} = \frac{j}{2} \left[ \omega_2 \frac{\partial \eta}{\partial s} - \left[ \eta \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \phi_{22}^{(1)}}{\partial \eta} + \zeta \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \phi_{22}^{(1)}}{\partial \zeta} + \frac{\partial \phi_{22}^{(1)}}{\partial s} \right] + \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \phi_{42}^{(1)}}{\partial \zeta} \right] -$$

$$+ \frac{j}{2} \left[ \omega_2 \frac{\partial \eta}{\partial s} - \left[ \eta \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \eta} + \zeta \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \zeta} + \frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial s} \right] + \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \phi_{41}^{(1)}}{\partial \zeta} \right] \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi_{34}^{(2)}}{\partial n} = \frac{j}{2} \left[ \omega_2 \frac{\partial \zeta}{\partial s} - \left[ \eta \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \phi_{32}^{(1)}}{\partial \eta} + \zeta \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \phi_{32}^{(1)}}{\partial \zeta} + \frac{\partial \phi_{32}^{(1)}}{\partial s} \right] - \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \phi_{42}^{(1)}}{\partial \eta} \right] +$$

$$+ \frac{j}{2} \left[ \omega_1 \frac{\partial \zeta}{\partial s} - \left[ \eta \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \eta} + \zeta \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \zeta} + \frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial s} \right] - \frac{\partial}{\partial s} \frac{\partial \phi_{41}^{(1)}}{\partial \eta} \right] \quad (8)$$

Граничные условия на свободной поверхности жидкости при изолированных колебаниях имеют вид:

$$\frac{\partial \phi_{mm}^{(2)}}{\partial \zeta} - K_4 \phi_{mm}^{(2)} = M_{mm+}^{(2)} =$$

$$= j \frac{(\omega_1 + \omega_2)}{g} \left\{ \frac{\partial \phi_{m1}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \phi_{m2}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{m1}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \phi_{m2}^{(1)}}{\partial \zeta} \right\} -$$

$$- \frac{j \omega_1}{2g} \left\{ \phi_{m1}^{(1)} \left( \frac{\partial^2 \phi_{m2}^{(1)}}{\partial \zeta^2} - K_2 \frac{\partial \phi_{m2}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \right\} -$$

$$- \frac{j \omega_2}{2g} \left\{ \phi_{m2}^{(1)} \left( \frac{\partial^2 \phi_{m1}^{(1)}}{\partial \zeta^2} - K_1 \frac{\partial \phi_{m1}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \right\} \quad (9)$$

При взаимосвязанных колебаниях  $m, k = 2, 3, 4; m < k$

$$\frac{\partial \phi_{mk}^{(2)}}{\partial \zeta} - K_4 \phi_{mk}^{(2)} = M_{mk+}^{(2)} =$$

$$= j \frac{(\omega_1 + \omega_2)}{g} \left\{ \frac{\partial \phi_{m1}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \phi_{k2}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{k1}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \phi_{m2}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{m1}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \phi_{k2}^{(1)}}{\partial \zeta} + \frac{\partial \phi_{k1}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \phi_{m2}^{(1)}}{\partial \zeta} \right\} -$$

$$- \frac{j \omega_1}{2g} \left\{ \phi_{m1}^{(1)} \left( \frac{\partial^2 \phi_{k2}^{(1)}}{\partial \zeta^2} - K_2 \frac{\partial \phi_{k2}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) + \phi_{k1}^{(1)} \left( \frac{\partial^2 \phi_{m2}^{(1)}}{\partial \zeta^2} - K_2 \frac{\partial \phi_{m2}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \right\} -$$

$$- \frac{j \omega_2}{2g} \left\{ \phi_{m2}^{(1)} \left( \frac{\partial^2 \phi_{k1}^{(1)}}{\partial \zeta^2} - K_1 \frac{\partial \phi_{k1}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) + \phi_{k2}^{(1)} \left( \frac{\partial^2 \phi_{m1}^{(1)}}{\partial \zeta^2} - K_1 \frac{\partial \phi_{m1}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \right\}, \quad (10)$$

где

$$K_1 = \frac{(\omega_1)^2}{g}; \quad K_2 = \frac{(\omega_2)^2}{g}; \quad K_4 = \frac{(\omega_1 + \omega_2)^2}{g}. \quad (11)$$

В условиях (3)-(11) потенциалы первого порядка для каждого вида колебаний определяются на основании решения соответствующих линейных задач [2].

Для определения всех потенциалов второго порядка используется комбинированный метод интегральных уравнений Гельмгольца [5], основанный на введении следующих комбинаций:

$$\phi_{mm}^{(2)} = \phi_{mm1} + \phi_{mm2};$$

$$\phi_{mk}^{(2)} = \phi_{mk1} + \phi_{mk2}, \quad (12)$$

где потенциалы  $\phi_{mm1}, \phi_{mk1}$  учитывают граничное условие на свободной поверхности, а  $\phi_{mm2}, \phi_{mk2}$  - на контуре. Тогда, можно записать:

$$\frac{\partial \phi_{mm2}}{\partial n} = \frac{\partial \phi_{mm}^{(2)}}{\partial n} - \frac{\partial \phi_{mm1}}{\partial n};$$

$$\frac{\partial \phi_{mk2}}{\partial n} = \frac{\partial \phi_{mk}^{(2)}}{\partial n} - \frac{\partial \phi_{mk1}}{\partial n} \quad (13)$$

Для определения функций  $\phi_{nm1}, \phi_{mk1}$  используется модифицированный метод Вехаузена-Лайтона [6], согласно которому:

$$\begin{aligned} \phi_{nm1} + i\tilde{\phi}_{nm1} &= 2i \int_{\eta_1}^{\infty} M_{mn+}^{(2)} e^{-iK_4(\zeta-l)} dl + \\ &+ \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} M_{mn+}^{(2)} e^{-iK_4(\zeta-l)} E_1(-iK_4(\zeta-l)) dl + \\ &+ (j-i) \int_{-\infty}^{\infty} M_{mn+}^{(2)} e^{-iK_4(\zeta-l)} dl, \end{aligned} \quad (14)$$

Аналогичным образом определяются и соответствующие потенциалы при взаимосвязанных колебаниях:

$$\begin{aligned} \phi_{mk1} + i\tilde{\phi}_{mk1} &= 2i \int_{\eta_1}^{\infty} M_{mk+}^{(2)} e^{-iK_4(\zeta-l)} dl + \\ &+ \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} M_{mk+}^{(2)} e^{-iK_4(\zeta-l)} E_1(-iK_4(\zeta-l)) dl + \\ &+ (j-i) \int_{-\infty}^{\infty} M_{mk+}^{(2)} e^{-iK_4(\zeta-l)} dl, \end{aligned} \quad (15)$$

Все потенциалы второго порядка  $\phi_{mk2}, \phi_{nm2}$  определяются на основании решения следующей системы интегральных уравнений

$$\begin{aligned} &-\phi_{mk2}(\eta, \zeta) + \\ &+ \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L \phi_{mk2}(\eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G}{\partial n}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L \frac{\partial \phi_{mk2}}{\partial n} \cdot G(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds; \\ &-\phi_{nm2}(\eta, \zeta) + \\ &+ \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L \phi_{nm2}(\eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G}{\partial n}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L \frac{\partial \phi_{nm2}}{\partial n} \cdot G(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds, \end{aligned} \quad (16)$$

где функция Грина имеет вид:

$$\begin{aligned} G(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) &= \text{Re}_j \left\{ \log \left( \frac{\tilde{\zeta} - \zeta^*}{\zeta - \tilde{\zeta}^*} \right) + \right. \\ &+ \left. 2 \int_0^{\infty} \frac{e^{-jk(\zeta - \tilde{\zeta}^*)}}{K_4 - k} dk - j2\pi e^{-jK_4(\zeta - \tilde{\zeta}^*)} \right\}, \\ \tilde{\zeta} &= \eta + j\zeta; \quad \zeta^* = \eta_1 + j\zeta_1; \\ \tilde{\zeta}^* &= \eta_1 - j\zeta_1 \end{aligned} \quad (17)$$

После определения всех потенциалов второго порядка легко определить давление, действующее на контур и все гидродинамические силы, возникающие при взаимодействии трех видов колебаний. Выражения для давлений второго порядка при изолированных и взаимосвязанных колебаниях будут иметь вид:

$$\begin{aligned} p_{33}^{(2)} &= -\rho \left( -j(\omega_1 + \omega_2) \phi_{33}^{(2)} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \phi_{32}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \phi_{32}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) + \right. \\ &+ \left. \frac{b}{2} \left( \omega_1 \frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \zeta} + \omega_2 \frac{\partial \phi_{32}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \right); \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} p_{22}^{(2)} &= -\rho \left( -j(\omega_1 + \omega_2) \phi_{22}^{(2)} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \phi_{22}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \phi_{22}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) + \right. \\ &+ \left. \frac{b}{2} \left( \omega_1 \frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \eta} + \omega_2 \frac{\partial \phi_{22}^{(1)}}{\partial \eta} \right) \right); \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} p_{44}^{(2)} &= -\rho \left( -j(\omega_1 + \omega_2) \phi_{44}^{(2)} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \phi_{41}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \phi_{42}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{41}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \phi_{42}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{2} \left( \omega_1 \left( \eta \frac{\partial \phi_{41}^{(1)}}{\partial \zeta} - \zeta \frac{\partial \phi_{41}^{(1)}}{\partial \eta} \right) + \omega_2 \left( \eta \frac{\partial \phi_{42}^{(1)}}{\partial \zeta} - \zeta \frac{\partial \phi_{42}^{(1)}}{\partial \eta} \right) \right) \right) - \\ &- \rho \frac{1}{2} (\omega_1 \phi_{41}^{(1)} + \omega_2 \phi_{42}^{(1)}); \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} p_{23}^{(2)} &= -\rho \left( -j(\omega_1 + \omega_2) \phi_{23}^{(2)} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \phi_{32}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \phi_{32}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) + \right. \\ &+ \frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \phi_{22}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \phi_{22}^{(1)}}{\partial \zeta} \left. \right) + \\ &+ \frac{b}{2} \left( \omega_1 \frac{\partial \phi_{31}^{(1)}}{\partial \eta} + \omega_2 \frac{\partial \phi_{32}^{(1)}}{\partial \eta} \right) + \frac{b}{2} \left( \omega_1 \frac{\partial \phi_{21}^{(1)}}{\partial \zeta} + \omega_2 \frac{\partial \phi_{22}^{(1)}}{\partial \zeta} \right); \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
 p_{24}^{(2)} = & -\rho(-j(\omega_1 + \omega_2)\phi_{24}^{(2)} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\phi_{21}^{(1)}}{\partial\eta}\frac{\partial\phi_{42}^{(1)}}{\partial\eta} + \frac{\partial\phi_{21}^{(1)}}{\partial\zeta}\frac{\partial\phi_{42}^{(1)}}{\partial\zeta} + \right. \\
 & \left. + \frac{\partial\phi_{41}^{(1)}}{\partial\eta}\frac{\partial\phi_{22}^{(1)}}{\partial\eta} + \frac{\partial\phi_{41}^{(1)}}{\partial\zeta}\frac{\partial\phi_{22}^{(1)}}{\partial\zeta}\right) + \\
 & + \frac{b}{2}\left(\omega_1\frac{\partial\phi_{41}^{(1)}}{\partial\eta} + \omega_2\frac{\partial\phi_{42}^{(1)}}{\partial\eta}\right) + \frac{1}{2}\left(\omega_1\left(\eta\frac{\partial\phi_{21}^{(1)}}{\partial\zeta} - \zeta\frac{\partial\phi_{21}^{(1)}}{\partial\eta}\right) + \right. \\
 & \left. + \omega_2\left(\eta\frac{\partial\phi_{22}^{(1)}}{\partial\zeta} - \zeta\frac{\partial\phi_{22}^{(1)}}{\partial\eta}\right)\right) - \rho\frac{1}{2}(\omega_1\phi_{21}^{(1)} + \omega_2\phi_{22}^{(1)}); \tag{22}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_{34}^{(2)} = & -\rho\left(-j(\omega_1 + \omega_2)\phi_{34}^{(2)} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\phi_{31}^{(1)}}{\partial\eta}\frac{\partial\phi_{42}^{(1)}}{\partial\eta} + \frac{\partial\phi_{31}^{(1)}}{\partial\zeta}\frac{\partial\phi_{42}^{(1)}}{\partial\zeta} + \right. \right. \\
 & \left. + \frac{\partial\phi_{41}^{(1)}}{\partial\eta}\frac{\partial\phi_{32}^{(1)}}{\partial\eta} + \frac{\partial\phi_{41}^{(1)}}{\partial\zeta}\frac{\partial\phi_{32}^{(1)}}{\partial\zeta}\right) + \frac{b}{2}\left(\omega_1\frac{\partial\phi_{41}^{(1)}}{\partial\zeta} + \omega_2\frac{\partial\phi_{42}^{(1)}}{\partial\zeta}\right) + \\
 & + \frac{1}{2}\left(\omega_1\left(\eta\frac{\partial\phi_{31}^{(1)}}{\partial\zeta} - \zeta\frac{\partial\phi_{31}^{(1)}}{\partial\eta}\right) + \omega_2\left(\eta\frac{\partial\phi_{32}^{(1)}}{\partial\zeta} - \zeta\frac{\partial\phi_{32}^{(1)}}{\partial\eta}\right)\right) - \\
 & - \rho\frac{1}{2}(\omega_1\phi_{31}^{(1)} + \omega_2\phi_{32}^{(1)}). \tag{23}
 \end{aligned}$$

Все нелинейные силы и моменты определяются путем интегрирования выражений (18)-(23) по контуру шпангоута.

**2. Анализ результатов расчета**

На основании изложенного метода была разработана программа и проведены расчеты нелинейных сил и моментов для различных типов контуров. На рис.1-3 представлены результаты расчетов нелинейных вертикальных и горизонтальных сил, обусловленных суммой частот в сопоставлении с расчетами по методу [2] для бульбообразного и эллиптического контуров.

В целях сравнения полученных результатов все расчеты проводились при

$$\eta_{m1}^{(1)} = \eta_{m2}^{(1)} = b,$$

$$\zeta_{m1}^{(1)} = \zeta_{m2}^{(1)} = b,$$

$$(24)$$

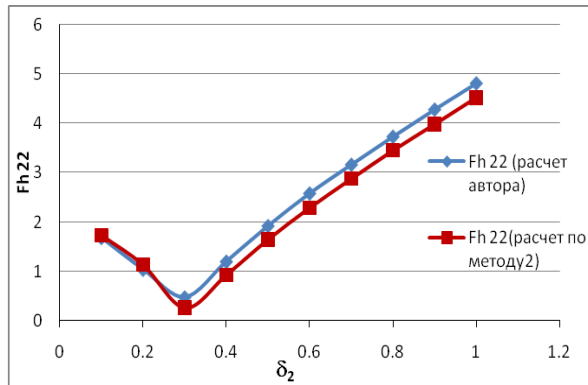
$$b\theta_{m1}^{(1)} = b\theta_{m2}^{(1)} = b,$$

где  $b$ -полуширина контура и

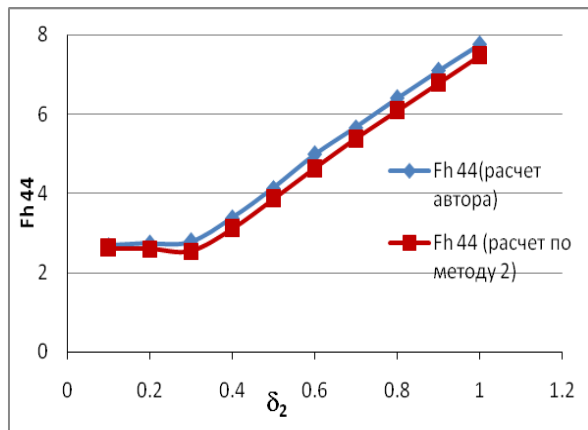
$$\delta_{\eta 1}^{(1)} = \delta_{\zeta 1}^{(1)} = \delta_{\theta 1}^{(1)} = \delta_{\eta 2}^{(1)} = \delta_{\zeta 2}^{(1)} = \delta_{\theta 2}^{(1)} = 0$$

при различных сочетаниях безразмерных волновых чисел  $\delta_1 = \frac{\omega^2 b}{g}$  и

$$\delta_2 = \frac{\omega^2 b}{g}.$$

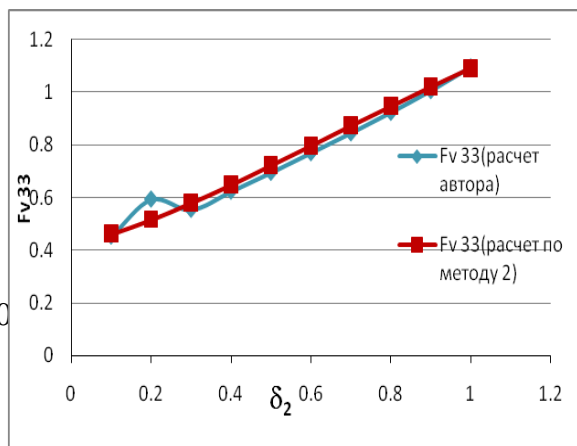


А)

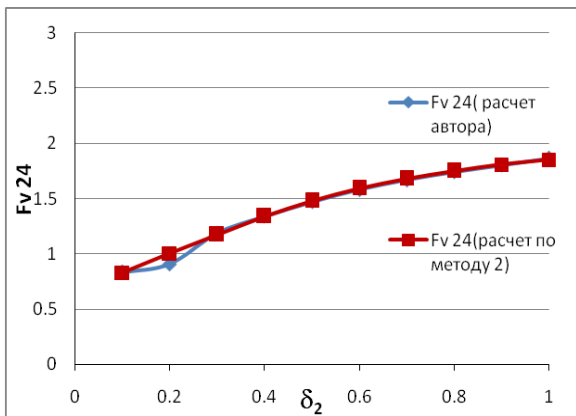


Б)

Рис 1 Значения нелинейных горизонтальных сил, обусловленных суммой частот и возникающих при изолированных поперечно-горизонтальных колебаниях А) и бортовых колебаниях Б) бульбообразного контура( T/b=2.5,β=0.7)

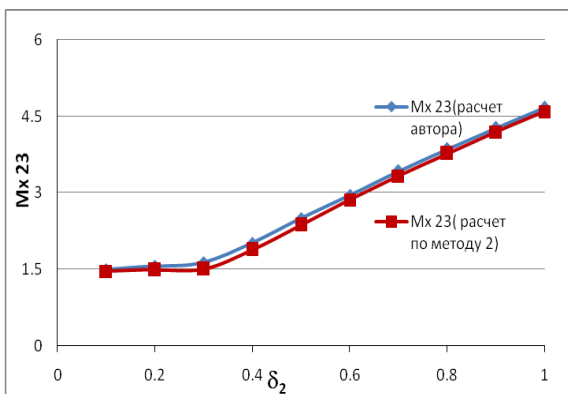


А)

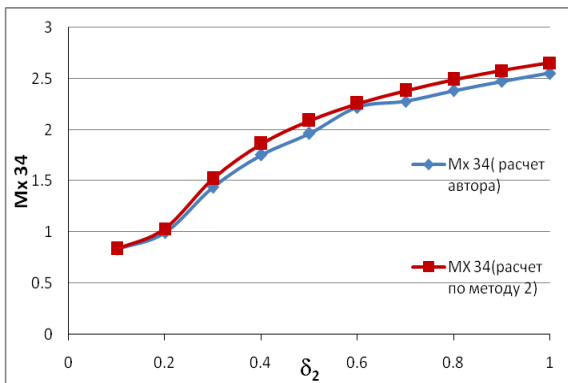


Б)

Рис.2 Значения нелинейных вертикальных сил, обусловленных суммой частот и возникающих при вертикальных А) и при взаимосвязанных поперечно-горизонтальных и бортовых колебаниях Б) для U-образного контура ( $T/b=0.6, \beta=0.9$ )



А)



Б)

Рис.3 Значения нелинейных моментов, обусловленных суммой частот и возникающих при совместных вертикальных и поперечно-горизонтальных А) и совместных вертикальных и бортовых колебаниях Б) бульбообразного контура ( $T/b=2.5, \beta=0.7$ )

Проведенное сравнение расчетов по изложенному методу с расчетами по методу [2] для разных контуров показало практически полное совпадение результатов (рис.1-3).

В целях исследования влияния отношения осадки к полуширине на значения нелинейных

сил и моментов были произведены расчеты для двух групп контуров [1, 3, 4]. В первой группе бульбообразных контуров при постоянном коэффициенте полноты  $\beta=0.7$  значения отношения  $T/b$  принимались равными 0.6, 0.8, 1, 1.4, 1.8. В группе U-образных контуров коэффициент полноты  $\beta=0.9$ .

Характерные результаты расчетов нелинейных сил и моментов при изменении отношения осадки к полуширине приведены на рис.4-9

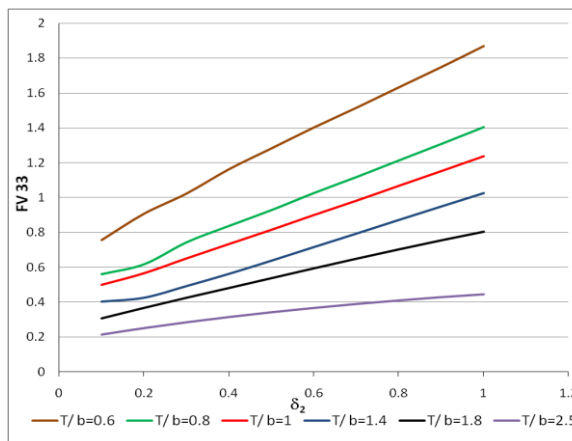


Рис. 4 Значения нелинейных вертикальных сил, возникающих при вертикальных колебаниях в зависимости от изменения отношения  $T/b$  для бульбообразных шпангоутов

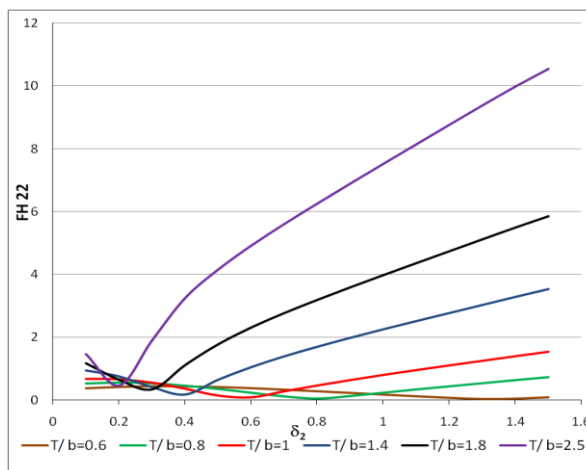


Рис. 5 Значения нелинейных горизонтальных сил, возникающих при поперечно-горизонтальных колебаниях в зависимости от изменения отношения  $T/b$  для бульбообразных шпангоутов

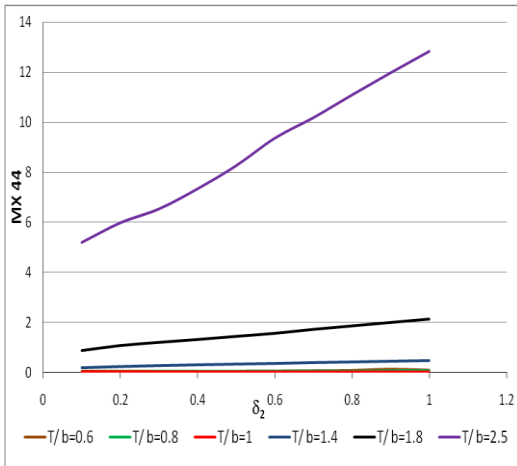


Рис. 6 Значения нелинейных моментов, возникающих при БК в зависимости от изменения отношения  $T/b$  для бульбообразных шпангоутов

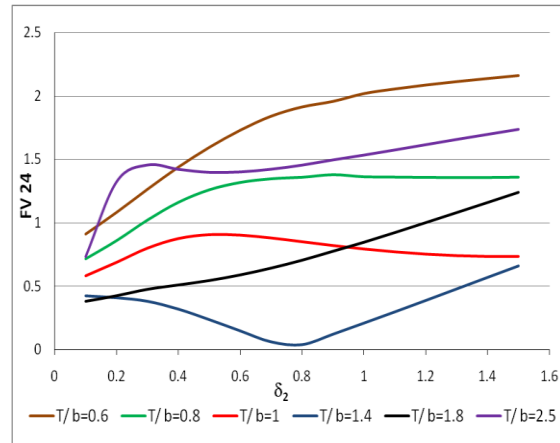


Рис. 9 Значения нелинейных вертикальных сил, возникающих при взаимосвязанных ПГК и БК в зависимости от изменения отношения  $T/b$  для U-образных шпангоутов

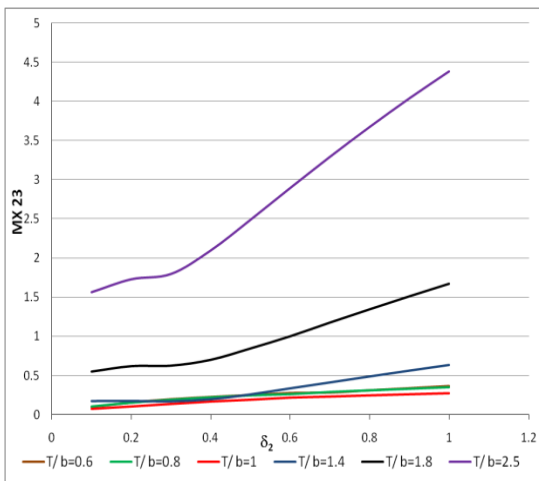


Рис. 7 Значения нелинейных моментов, возникающих при взаимосвязанных ПГК и ВК в зависимости от изменения отношения  $T/b$  для U-образных шпангоутов

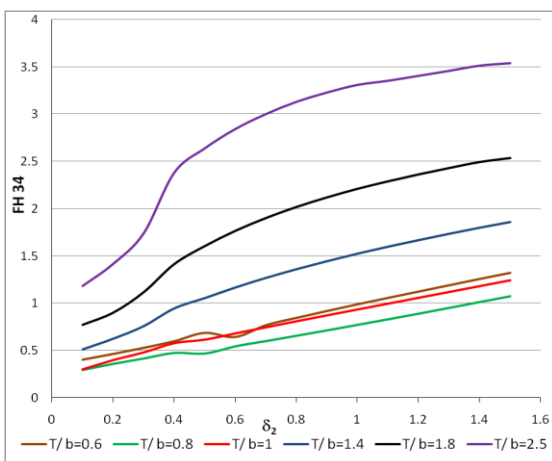


Рис. 8. Значения нелинейных горизонтальных сил, возникающих при взаимосвязанных БК и ВК в зависимости от изменения отношения  $T/b$  для бульбообразных шпангоутов

Анализ полученных результатов показывает, что нелинейные вертикальные силы, имеющие место при вертикальных колебаниях являются возрастающими функциями волнового числа и значительно увеличиваются на всем диапазоне его изменения при уменьшении отношения  $T/b$ . На рис.4 можно видеть, что  $Fv_{33+}(T/b=0,6)$  в 4-9 раз больше соответствующих значений  $Fv_{33+}(T/b=2,5)$  для бульбообразных шпангоутов.

Нелинейные горизонтальные и вертикальные силы и моменты, возникающие при поперечно-горизонтальных и бортовых колебаниях возрастают при увеличении суммы частот (рис.5,6). При этом для горизонтальной силы  $Fh_{22+}$  характерно наличие волнообразного изгиба графика, смещающегося в сторону больших значений волнового числа при уменьшении отношения  $T/b$ . Отмеченное поведение зависимости  $Fh_{22+} = f(\omega_1 + \omega_2)$  полностью совпадает с нелинейными горизонтальными силами  $Fh_{22} = f(2\omega)$  [2]. При поперечно-горизонтальных колебаниях увеличение отношения  $T/b$  приводит к многократному увеличению горизонтальных и вертикальных сил. Нелинейные моменты  $Mx_{22+}$  уменьшаются при увеличении  $T/b$  от 0,6 до 1, затем возрастают при дальнейшем увеличении отношения.

В случае бортовых колебаний увеличение отношения осадки к полуширине  $T/b$  приводит к значительному увеличению горизонтальных сил  $Fh_{44+}$ , наибольшие значения которых имеют место при  $T/b=2,5$ . Вертикальные силы и моменты уменьшаются при увеличении  $T/b$  от 0.6 до 1, затем возрастают (рис.6).

На рис.7-9 приведены результаты расчетов нелинейных сил, возникающих при взаимосвя-



занных колебаниях .Анализ полученных результатов показал, что все нелинейные силы и моменты  $Fh_{23+}, Fh_{34+}, Mx_{23+}, Mx_{34+}, Fv_{24+}$  увеличиваются при возрастании суммы частот.

В случае взаимосвязанных вертикальных и поперечно-горизонтальных колебаний и вертикальных и бортовых нелинейные горизонтальные силы и моменты уменьшаются при увеличении отношения  $T/b$  от 0.6 до 1, и увеличиваются при дальнейшем возрастании  $T/b$  от 1 до 2.5 Например, горизонтальная сила  $Fh_{34+}$  ( $T/b=2,5$ ) в 4,4 раз больше  $Fh_{34+}$  ( $T/b=0,8$ ) в случае  $\delta_2=1$ .(рис.8)

Нелинейные вертикальные силы  $Fv_{24+}$ ,имеющие место при взаимосвязанных поперечно-горизонтальных и бортовых колебаниях уменьшаются при увеличении отношения  $T/b$  от 0.6 до 1.4. При дальнейшем увеличении  $T/b$  от 1.4 до 2.5 наблюдается возрастание вертикальных сил (рис.9) для обеих рассмотренных серий шпангоутов

В целях исследования влияния коэффициента полноты на значения нелинейных сил и моментов были произведены расчеты для двух групп контуров, в которых при одинаковых отношениях  $T/b=1$  и  $T/b=0,75$  коэффициент полноты площади шпангоутного контура  $\beta$  принимает значения: 0.5,0.6,0.7,0.8,0.9 и 1.

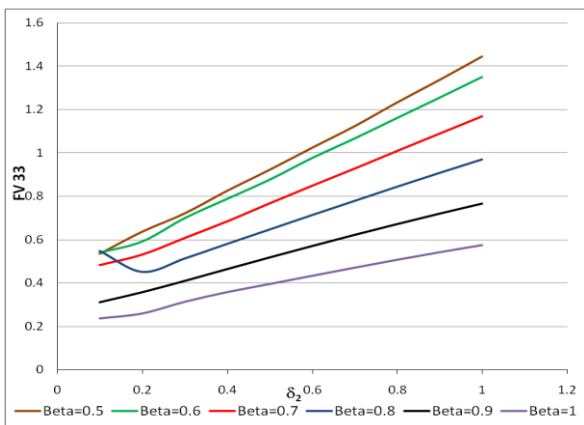


Рис.10 Значения нелинейных вертикальных сил, возникающих при ВК контуров на волнении в зависимости от изменения коэффициента полноты ( $T/b=0,75$ ).

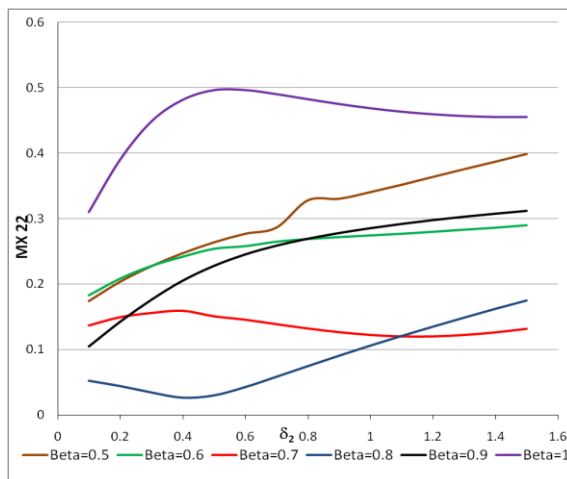


Рис.11 Значения нелинейных моментов, возникающих при ПГК контуров в зависимости от изменения коэффициента полноты ( $T/b=0,75$ ).

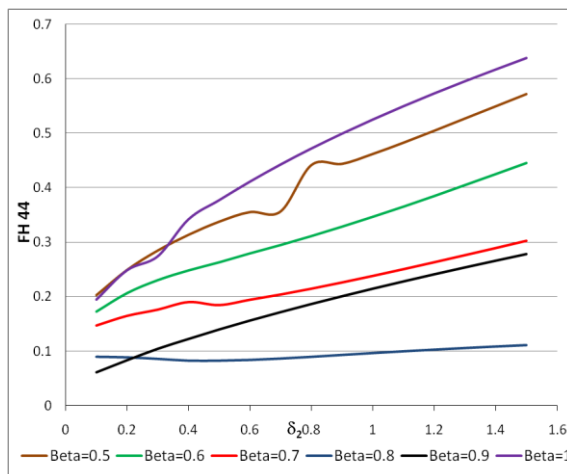


Рис.12 Значения нелинейных горизонтальных сил, возникающих при БК контуров в зависимости от изменения коэффициента полноты ( $T/b=0,75$ ).

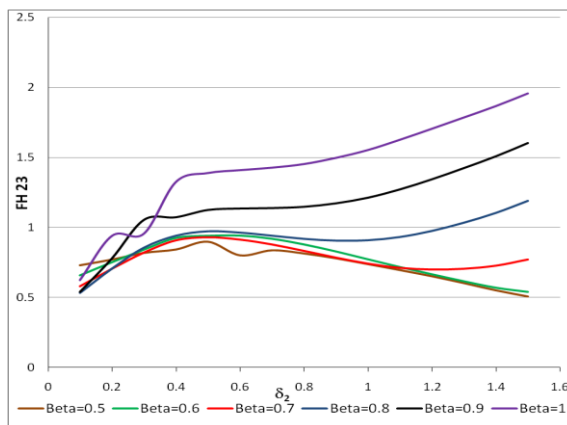


Рис.13 Значения нелинейных горизонтальных сил, возникающих при совместных ПГК и ВК контуров в зависимости от изменения коэффициента полноты ( $T/b=1$ ).

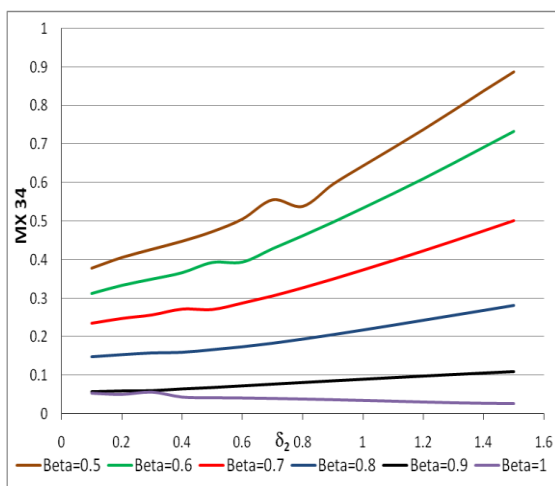


Рис.14 Значения нелинейных моментов, возникающих при взаимосвязанных ВК и БК ( $T/b=0,75$ ) в зависимости от изменения коэффициента полноты.

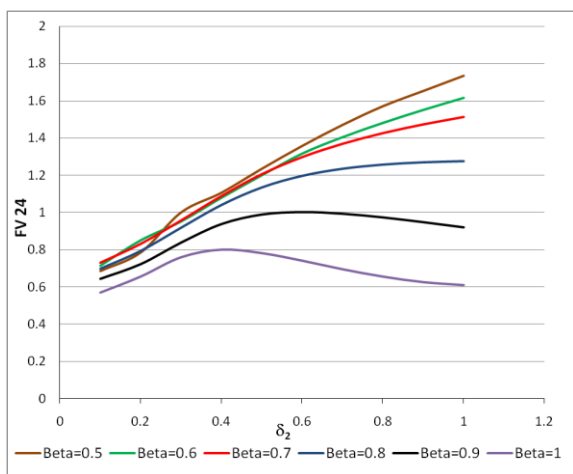


Рис.15 Значения нелинейных вертикальных сил, возникающих при взаимосвязанных ПГК и БК контуров на волнении в зависимости от изменения коэффициента полноты ( $T/b=1$ ).

Анализ влияния коэффициента полноты на данные силы показывает, что нелинейные вертикальные силы  $F_{v33+}$  и  $F_{v22+}$  увеличиваются при уменьшении коэффициента полноты (рис.10).

Нелинейные горизонтальные силы  $F_{h22+}$  уменьшаются при увеличении  $\beta$  от 0.5 до 0.7. При дальнейшем увеличении коэффициента полноты горизонтальные силы также начинают возрастать. Нелинейные моменты  $M_{x22+}$  уменьшаются при увеличении коэффициента  $\beta$  от 0.5 до 0.8, затем возрастают. Наибольшие значения данных моментов наблюдаются у прямоугольных шпангоутов (рис.11)

В случае бортовых колебаний все возникающие силы  $F_{h44+}$ ,  $F_{v44+}$  и  $M_{x44+}$  для обеих групп контуров уменьшаются при увеличении коэффициента полноты от 0.5 до 0.8, затем возрастают при увеличении  $\beta$  от 0.8 до 1. Из приведенных результатов можно видеть, что нели-

нейные силы и моменты таким образом становятся соизмеримыми для треугольных и прямоугольных шпангоутов. Минимальные значения данных сил наблюдаются у контуров, форма которых близка к круглой.

Результаты расчетов нелинейных сил и моментов, возникающих при взаимосвязанных поперечно-горизонтальных и вертикальных, вертикальных и бортовых, поперечно-горизонтальных и бортовых колебаниях групп контуров с отношениями  $T/b=1$  и  $T/b=0,75$  приведены на рис.13-15. Видно, что нелинейные горизонтальные силы  $F_{h23+}$  увеличиваются на всем диапазоне волновых чисел при увеличении коэффициента полноты. При этом значения данных сил для прямоугольных шпангоутов могут превосходить соответствующие значения для треугольных контуров в 2-4 раза (рис.13).

Нелинейные моменты  $M_{x23+}$  уменьшаются при увеличении коэффициента  $\beta$  от 0.5 до 0.8 и возрастают при дальнейшем увеличении коэффициента до 1.

Нелинейные горизонтальные силы  $F_{h34+}$  и моменты  $M_{x34+}$  уменьшаются при увеличении коэффициента  $\beta$  от 0.5 до 0.8 и возрастают при дальнейшем увеличении коэффициента до 1 для группы контуров с отношением  $T/b = 1$ . Для контуров с  $T/b$ , отличным от единицы, моменты  $M_{x34+}$  уменьшаются при увеличении коэффициента полноты (рис.14)

Нелинейные вертикальные силы  $F_{v24+}$  возрастают при уменьшении коэффициента полноты (рис.15) и имеют наибольшие значения для треугольных контуров..

### Выводы

Разработанный метод расчета нелинейных сил, обусловленных суммой частот позволяет избежать влияния «нерегулярных частот» по сравнению с классическим методом интегральных уравнений.

Проведенное исследование влияния геометрических параметров контуров на нелинейные силы, вызванные отдельными видами колебаний и их взаимодействием позволило сделать следующие выводы:

1. Нелинейные горизонтальные силы возрастают при увеличении отношения  $T/b$  и коэффициента полноты  $\beta$  в случае поперечно-горизонтальных, бортовых колебаний контура и взаимодействии поперечно-горизонтальных и вертикальных колебаний, вертикальных и бортовых.

2. Нелинейные вертикальные силы возрастают при уменьшении отношения  $T/b$  и коэффициента полноты в случае вертикальных колебаний и взаимодействия поперечно-горизонтальных и бортовых.
3. Нелинейные моменты, обусловленные суммой частот, в случае поперечно-горизонтальных, бортовых колебаний и взаимодействии поперечно-горизонтальных и вертикальных, вертикальных и бортовых колебаний уменьшаются при изменении отношения  $T/b$  от 0.6 до 1 и коэффициента полноты  $\beta$  от 0.5 до 0.8 и возрастают при дальнейшем увеличении  $T/b$  от 1 до 1.8 и  $\beta$  от 0.8 до 1.
- Таким образом, полученные результаты показывают на необходимость учета нелинейных сил, обусловленных суммой частот, при дальнейшей разработке алгоритмов расчета нелинейной качки судна и других морских объектов в условиях нерегулярного волнения.

### Литература

- 1) Семенова В.Ю., Киав Тхура (2015) Определение нелинейных сил второго порядка, обусловленных разностью частот при дифракции волнения от неподвижного контура. Морские интеллектуальные технологии, N4(30), т.1 стр.16-22
- 2) Семенова В.Ю. "Разработка метода расчета нелинейной качки судов". Дисс. на соискание уч. степени д.т.н. СПбГМТУ 2005г.
- 3) Семенова В.Ю., Киав Тхура (2016) Определение нелинейных сил второго порядка, обусловленных разностью частот и возникающих при поперечной качке шпангоутных контуров на тихой воде. Научно-технический сборник российского морского регистра судоходства, N 42/43, стр.75-82
- 4) Семенова В.Ю., Киав Тхура (2016) Определение нелинейных сил второго порядка, обусловленных разностью частот, возникающих при поперечно-горизонтальных, вертикальных и бортовых колебаниях контура на бихроматическом волнении. Морские интеллектуальные технологии, N2(32), т.1 стр.35-42
- 5) Papanikolaou A.(1988) On the solution of the quasi-third order problem of two-dimensional cylinders in Forced –Motion. Journal of the Kansai society of Naval Architecture of Japan N 210, pp.121-133.
- 6) Wehausen J.V., Laitone E.V.(1960) Surface waves. Encyclopedia of Physics. Berlin, Springer-Verlag, v.9, p.446-778

### References

1. Semenova V.Yu., Kiav Tkhura (2015) Opredelenie nelineynykh sil vtorogo poryadka, obuslovlennykh raznost'yu chastot pri difraktsii volneniya ot ne-podvizhnogo kontura. Morskie intellektual'nye tekhnologii, N4(30), t.1 str.16-22
2. Semenova V.Yu. "Razrabotka metoda rascheta nelineynoy kachki sudov". Diss. na soiskanie uch. stepeni d.t.n. SPbGMTU 2005g.
3. Semenova V.Yu., Kiav Tkhura (2016) Opredelenie nelineynykh sil vtorogo poryadka, obuslovlennykh raznost'yu chastot i vznikayushchikh pri poperechnoy kachke shpangoutnykh konturov na tikhoy vode. Nauchno-tekhnicheskii sbornik rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva, N 42/43, str.75-82
4. Semenova V.Yu., Kiav Tkhura (2016) Opredelenie nelineynykh sil vtorogo poryadka, obuslovlennykh raznost'yu chastot, vznikayushchikh pri poperechno-gorizontal'nykh, vertikal'nykh i bortovykh kolebaniyakh kontura na bikhroma-ticheskom volnenii. Morskie intellektual'nye tekhnologii, N2(32), t.1 str.35-42

- 
5. Papanikolaou A.(1988) On the solution of the quasi-third order problem of two-dimensional cylinders in Forced –Motion. Journal of the Kansai society of Naval Architecture of Japan N 210, pp.121-133.
  6. Wehausen J.V., Laitone E.V.(1960) Surface waves. Encyclopedia of Physics. Berlin, Springer-Verlag, v.9, p.446-778

УДК 629.12.073.243.4

## РАСЧЕТЫ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ СОВМЕСТНОЙ КАЧКЕ ДВУХ СУДОВ НА РЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ В УСЛОВИЯХ МЕЛКОВОДЬЯ

**Семенова Виктория Юрьевна**

Д.т.н., профессор, профессор кафедры теории корабля  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
тел: 8-905-229-71-98, e-mail: sem\_viktorial@mail.ru

**Аунг Мью Тхант**

аспирант  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
tel: +7 (951) 661-25-01 e-mail: aungmyothant.amt@mail.ru

### Аннотация

В статье рассматривается определение амплитудно-частотных характеристик, возникающих при совместной качке двух судов в условиях мелководья на основании ранее полученного решения трехмерной потенциальной задачи. Определение амплитуд качки обоих судов осуществляется на основании решения системы 12 связанных дифференциальных уравнений. Представленное решение в отечественной практике является новым. Результаты расчетов, полученные авторами приводятся в сопоставлении с результатами расчетов амплитудно-частотных характеристик, полученными Goos для совместной качки двух вертикальных цилиндров, а также вертикального цилиндра и параллелепипеда. Показано отличное согласование результатов между собой. Особое внимание уделяется исследованию влияния изменения расстояния между различными судами при их параллельном и последовательном расположении на амплитуды качки, имеющих место при различных курсовых углах. Расчеты приведены для разных пар судов. Анализ полученных результатов показывает увеличение значений амплитуд различных видов качки при расположении судов параллельно друг другу при уменьшении расстояния между ними. Показано влияние гидродинамического взаимодействия при качке на встречном волнении, проявляющееся в появлении поперечно-горизонтальных, бортовых колебаний и рысканья. Делается вывод о необходимости учета изменения расстояния между судами при определении амплитуд качки, действующих как на первое судно так и на второе при их расположении параллельно друг другу.

**Ключевые слова:** метод интегральных уравнений, функция Грина, амплитудно-частотные характеристики, мелководье, совместная качка, дифференциальные уравнения, трехмерная потенциальная задача, гидродинамическое взаимодействие.

## THE CALCULATIONS OF THE RESPONSE AMPLITUDE OPERATORS IN THE COUPLED MOTIONS OF TWO SHIPS ON THE REGULAR WAVES IN THE SHALLOW WATER

**Semenova Viktoriya Yur'evna**

Dr.Sci.Tech., the professor, the professor 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

**Aung Myo Thant**

post-graduate student  
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
tel: +7 (951) 661-25-01 e-mail: aungmyothant.amt@mail.ru

**Abstract**

This paper is about the determination of the response amplitude operators during the coupled motions of two ships in shallow water, based on the previous solution of the three dimensional potential problem. The determination of the amplitudes of the motions of both ships is based on the solution of a system of 12 coupled differential equations. The solution presented in the national practice is new. The results of calculations obtained by the authors are compared with the results obtained by Goo for coupled motions of the two vertical cylinders and the vertical cylinder and the parallelepiped. Shows a very good agreement of results among themselves. Special consideration is given to the investigation of the influence of the variation of distance between the ships, floating side-by-side and during their sequential arrangement on the amplitudes of different motions that occur at different incident wave angles. Calculations of these values are presented for different ships. Analysis of the results shows an increase of the values of amplitudes of different kind of motion for the case of the location of the ships side-by-side when the distance between them decreases Shows the effect of hydrodynamic interactions in the case of the motions on the head waves, manifested in the appearance of sway, roll motions and yaw. The conclusion about the necessity of taking into account the changing of the distance between the ships in determining of all six amplitudes acting on the first ship and the second in the case of the location side-by-side is made.

**Key words:** method of the integral equations, Green function, response amplitude operators, shallow water, the coupled motions of ship, differential equations, three dimensional potential problem, hydrodynamic interaction.

**Введение**

В предыдущих статьях авторов [2], [3] были последовательно изложены методы определения гидродинамических коэффициентов присоединенных масс и демпфирования и возмущающих сил при совместной качке судов на мелководье. В настоящей статье, являющейся продолжением вышеуказанных работ, рассматривается определение амплитуд при совместной качке двух судов. В отечественной практике параметры качки первого судна, стоящего по направлению распространения волн приближенно рассчитываются без учета присутствия второго судна. Параметры качки второго судна производят с учетом экранирующего эффекта от первого. [1].

В настоящей работе рассматривается определение амплитуд качки первого и второго судна на основании решения системы 12 дифференциальных уравнений, учитывающих в полной мере влияние гидродинамического взаимодействия как на коэффициенты присоединенных масс и демпфирования, так и на возмущающие силы.

**1. Описание расчетного метода**

Система дифференциальных уравнений совместной качки двух судов имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & (M_1 + \lambda_{11aa})\ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{13aa}\dot{\zeta}_{g1} + \lambda_{15aa}\ddot{\psi}_1 + \\
 & + \mu_{11aa}\dot{\xi}_{g1} + \mu_{13aa}\dot{\zeta}_{g1} + \mu_{15aa}\dot{\psi}_1 + \\
 & + \lambda_{12aa}\ddot{\eta}_{g1} + \lambda_{14aa}\ddot{\theta}_1 + \lambda_{16aa}\ddot{\chi}_1 + \\
 & + \mu_{12aa}\dot{\eta}_{g1} + \mu_{14aa}\dot{\theta}_1 + \mu_{16aa}\dot{\chi}_1 + \\
 & + \lambda_{11ba}\ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{13ba}\dot{\zeta}_{g2} + \lambda_{15ba}\ddot{\psi}_2 + \\
 & + \mu_{11ba}\dot{\xi}_{g2} + \mu_{13ba}\dot{\zeta}_{g2} + \mu_{15ba}\dot{\psi}_2 + \\
 & + \lambda_{12ba}\ddot{\eta}_{g2} + \lambda_{14ba}\ddot{\theta}_2 + \lambda_{16ba}\ddot{\chi}_2 + \\
 & + \mu_{12ba}\dot{\eta}_{g2} + \mu_{14ba}\dot{\theta}_2 + \mu_{16ba}\dot{\chi}_2 = F_{B\xi1} e^{-i\omega_k t}; \\
 & (M_1 + \lambda_{22aa})\ddot{\eta}_{g1} + \lambda_{24aa}\ddot{\theta}_1 + \lambda_{26aa}\ddot{\chi}_1 \\
 & + \mu_{22aa}\dot{\eta}_{g1} + \mu_{24aa}\dot{\theta}_1 + \mu_{26aa}\dot{\chi}_1 + \\
 & + \lambda_{21aa}\ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{23aa}\dot{\zeta}_{g1} + \lambda_{25aa}\ddot{\psi}_1 + \\
 & + \mu_{21aa}\dot{\xi}_{g1} + \mu_{23aa}\dot{\zeta}_{g1} + \mu_{25aa}\dot{\psi}_1 + \\
 & + \lambda_{22ba}\ddot{\eta}_{g2} + \lambda_{24ba}\ddot{\theta}_2 + \lambda_{26ba}\ddot{\chi}_2 + \\
 & + \mu_{22ba}\dot{\eta}_{g2} + \mu_{24ba}\dot{\theta}_2 + \mu_{26ba}\dot{\chi}_2 + \\
 & + \lambda_{21ba}\ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{23ba}\dot{\zeta}_{g2} + \lambda_{25ba}\ddot{\psi}_2 + \\
 & + \mu_{21ba}\dot{\xi}_{g2} + \mu_{23ba}\dot{\zeta}_{g2} + \mu_{25ba}\dot{\psi}_2 = F_{B\eta1} e^{-i\omega_k t};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (M_1 + \lambda_{33aa}) \ddot{\zeta}_{g1} + \lambda_{31aa} \ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{35aa} \ddot{\psi}_1 + \\
 & + \mu_{33aa} \dot{\zeta}_{g1} + \mu_{31aa} \dot{\xi}_{g1} + \mu_{35aa} \dot{\psi}_1 + \\
 & + \rho g S_1 \zeta_{g1} - \rho g S_1 X_{f1} \psi_1 + \lambda_{32aa} \ddot{\eta}_{g1} + \\
 & + \lambda_{34aa} \ddot{\theta}_1 + \lambda_{36aa} \ddot{\chi}_1 + \mu_{32aa} \dot{\eta}_{g1} + \\
 & + \mu_{34aa} \dot{\theta}_1 + \mu_{36aa} \dot{\chi}_1 + \lambda_{33ba} \ddot{\zeta}_{g2} + \\
 & + \lambda_{31ba} \ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{35ba} \ddot{\psi}_2 + \mu_{33ba} \dot{\zeta}_{g2} + \\
 & + \mu_{31ba} \dot{\xi}_{g2} + \mu_{35ba} \dot{\psi}_2 + \lambda_{32ba} \ddot{\eta}_{g2} + \\
 & + \lambda_{34ba} \ddot{\theta}_2 + \lambda_{36ba} \ddot{\chi}_2 + \mu_{32ba} \dot{\eta}_{g2} + \\
 & + \mu_{34ba} \dot{\theta}_2 + \mu_{36ba} \dot{\chi}_2 = F_{B\zeta 1} e^{-i\omega_k t};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (J_{xx1} + \lambda_{44aa}) \ddot{\theta}_1 + \lambda_{42aa} \ddot{\eta}_{g1} + \\
 & + \lambda_{46aa} \ddot{\chi}_1 + \mu_{44aa} \dot{\theta}_1 + \mu_{42aa} \dot{\eta}_{g1} + \\
 & + \mu_{46aa} \dot{\chi}_1 + D_1 h_{01} \theta_1 + \lambda_{41aa} \ddot{\xi}_{g1} + \\
 & + \lambda_{43aa} \ddot{\zeta}_{g1} + \lambda_{45aa} \ddot{\psi}_1 + \mu_{41aa} \dot{\xi}_{g1} + \\
 & + \mu_{43aa} \dot{\zeta}_{g1} + \mu_{45aa} \dot{\psi}_1 + \lambda_{44ba} \ddot{\theta}_2 + \\
 & + \lambda_{42ba} \ddot{\eta}_{g2} + \lambda_{46ba} \ddot{\chi}_2 + \mu_{44ba} \dot{\theta}_2 + \\
 & + \mu_{42ba} \dot{\eta}_{g2} + \mu_{46ba} \dot{\chi}_2 + \lambda_{41ba} \ddot{\xi}_{g2} + \\
 & + \lambda_{43ba} \ddot{\zeta}_{g2} + \lambda_{45ba} \ddot{\psi}_2 + \mu_{41ba} \dot{\xi}_{g2} + \\
 & + \mu_{43ba} \dot{\zeta}_{g2} + \mu_{45ba} \dot{\psi}_2 = F_{B\theta 1} e^{-i\omega_k t};
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 & (J_{yy1} + \lambda_{55aa}) \ddot{\psi}_1 + \lambda_{51aa} \ddot{\xi}_{g1} + \\
 & + \lambda_{53aa} \ddot{\zeta}_{g1} + \mu_{55aa} \dot{\psi}_1 + \mu_{51aa} \dot{\xi}_{g1} + \\
 & + \mu_{53aa} \dot{\zeta}_{g1} + D_1 H_{01} \psi_1 - \rho g S_1 X_{f1} \zeta_{g1} + \\
 & + \lambda_{52aa} \ddot{\eta}_{g1} + \lambda_{54aa} \ddot{\theta}_1 + \lambda_{56aa} \ddot{\chi}_1 + \\
 & + \mu_{52aa} \dot{\eta}_{g1} + \mu_{54aa} \dot{\theta}_1 + \mu_{56aa} \dot{\chi}_1 + \\
 & + \lambda_{55ba} \ddot{\psi}_2 + \lambda_{51ba} \ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{53ba} \ddot{\zeta}_{g2} + \\
 & + \mu_{55ba} \dot{\psi}_2 + \mu_{51ba} \dot{\xi}_{g2} + \mu_{53ba} \dot{\zeta}_{g2} + \\
 & + \lambda_{52ba} \ddot{\eta}_{g2} + \lambda_{54ba} \ddot{\theta}_2 + \lambda_{56ba} \ddot{\chi}_2 + \\
 & + \mu_{52ba} \dot{\eta}_{g2} + \mu_{54ba} \dot{\theta}_2 + \\
 & + \mu_{56ba} \dot{\chi}_2 = F_{B\psi 1} e^{-i\omega_k t};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (J_{zz1} + \lambda_{66aa}) \ddot{\chi}_1 + \lambda_{62aa} \ddot{\eta}_{g1} + \lambda_{64aa} \ddot{\theta}_1 + \\
 & + \mu_{66aa} \dot{\chi}_1 + \mu_{62aa} \dot{\eta}_{g1} + \mu_{64aa} \dot{\theta}_1 + \\
 & + \lambda_{61aa} \ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{63aa} \ddot{\zeta}_{g1} + \lambda_{65aa} \ddot{\psi}_1 + \\
 & + \mu_{61aa} \dot{\xi}_{g1} + \mu_{63aa} \dot{\zeta}_{g1} + \mu_{65aa} \dot{\psi}_1 + \\
 & + \lambda_{66ba} \ddot{\chi}_2 + \lambda_{62ba} \ddot{\eta}_{g2} + \lambda_{64ba} \ddot{\theta}_2 + \\
 & + \mu_{66ba} \dot{\chi}_2 + \mu_{62ba} \dot{\eta}_{g2} + \mu_{64ba} \dot{\theta}_2 + \\
 & + \lambda_{61ba} \ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{63ba} \ddot{\zeta}_{g2} + \lambda_{65ba} \ddot{\psi}_2 + \\
 & + \mu_{61ba} \dot{\xi}_{g2} + \mu_{63ba} \dot{\zeta}_{g2} + \\
 & + \mu_{65ba} \dot{\psi}_2 = F_{B\chi 1} e^{-i\omega_k t}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (M_2 + \lambda_{11bb})\ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{13bb}\ddot{\zeta}_{g2} + \lambda_{15bb}\ddot{\psi}_2 + \\
 & + \mu_{11bb}\dot{\xi}_{g2} + \mu_{13bb}\dot{\zeta}_{g2} + \mu_{15bb}\dot{\psi}_2 + \\
 & + \lambda_{12bb}\ddot{\eta}_{g2} + \lambda_{14bb}\ddot{\theta}_2 + \lambda_{16bb}\ddot{\chi}_2 + \\
 & + \mu_{12bb}\dot{\eta}_{g2} + \mu_{14bb}\dot{\theta}_2 + \mu_{16bb}\dot{\chi}_2 + \\
 & + \lambda_{11ab}\ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{13ab}\ddot{\zeta}_{g1} + \lambda_{15ab}\ddot{\psi}_1 + \\
 & + \mu_{11ab}\dot{\xi}_{g1} + \mu_{13ab}\dot{\zeta}_{g1} + \mu_{15ab}\dot{\psi}_1 + \\
 & + \lambda_{12ab}\ddot{\eta}_{g1} + \lambda_{14ab}\ddot{\theta}_1 + \lambda_{16ab}\ddot{\chi}_1 + \\
 & + \mu_{12ab}\dot{\eta}_{g1} + \mu_{14ab}\dot{\theta}_1 + \mu_{16ab}\dot{\chi}_1 = F_{B\xi 2} e^{-i\omega_k t};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (M_2 + \lambda_{22bb})\ddot{\eta}_{g2} + \lambda_{24bb}\ddot{\theta}_2 + \lambda_{26bb}\ddot{\chi}_2 + \\
 & + \mu_{22bb}\dot{\eta}_{g2} + \mu_{24bb}\dot{\theta}_2 + \mu_{26bb}\dot{\chi}_2 + \\
 & + \lambda_{21bb}\ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{23bb}\ddot{\zeta}_{g2} + \lambda_{25bb}\ddot{\psi}_2 + \\
 & + \mu_{21bb}\dot{\xi}_{g2} + \mu_{23bb}\dot{\zeta}_{g2} + \mu_{25bb}\dot{\psi}_2 + \\
 & + \lambda_{22ab}\ddot{\eta}_{g1} + \lambda_{24ab}\ddot{\theta}_1 + \lambda_{26ab}\ddot{\chi}_1 + \\
 & + \mu_{22ab}\dot{\eta}_{g1} + \mu_{24ab}\dot{\theta}_1 + \mu_{26ab}\dot{\chi}_1 + \\
 & + \lambda_{21ab}\ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{23ab}\ddot{\zeta}_{g1} + \lambda_{25ab}\ddot{\psi}_1 + \\
 & + \mu_{21ab}\dot{\xi}_{g1} + \mu_{23ab}\dot{\zeta}_{g1} + \mu_{25ab}\dot{\psi}_1 = F_{B\eta 2} e^{-i\omega_k t};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (M_2 + \lambda_{33bb})\ddot{\zeta}_{g2} + \lambda_{31bb}\ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{35bb}\ddot{\psi}_2 + \\
 & + \mu_{33bb}\dot{\zeta}_{g2} + \mu_{31bb}\dot{\xi}_{g2} + \mu_{35bb}\dot{\psi}_2 + \\
 & + \rho g S_2 \zeta_{g2} - \rho g S_2 X_{f2} \psi_2 + \lambda_{32bb}\ddot{\eta}_{g2} + \\
 & + \lambda_{34bb}\ddot{\theta}_2 + \lambda_{36bb}\ddot{\chi}_2 + \mu_{32bb}\dot{\eta}_{g2} + \\
 & + \mu_{34bb}\dot{\theta}_2 + \mu_{36bb}\dot{\chi}_2 + \lambda_{33ab}\ddot{\zeta}_{g1} + \\
 & + \lambda_{31ab}\ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{35ab}\ddot{\psi}_1 + \mu_{33ab}\dot{\zeta}_{g1} + \\
 & + \mu_{31ab}\dot{\xi}_{g1} + \mu_{35ab}\dot{\psi}_1 + \lambda_{32ab}\ddot{\eta}_{g1} + \\
 & + \lambda_{34ab}\ddot{\theta}_1 + \lambda_{36ab}\ddot{\chi}_1 + \mu_{32ab}\dot{\eta}_{g1} + \\
 & + \mu_{34ab}\dot{\theta}_1 + \mu_{36ab}\dot{\chi}_1 = F_{B\zeta 2} e^{-i\omega_k t};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (J_{xx2} + \lambda_{44bb})\ddot{\theta}_2 + \lambda_{42bb}\ddot{\eta}_{g2} + \\
 & + \lambda_{46bb}\ddot{\chi}_2 + \mu_{44bb}\dot{\theta}_2 + \mu_{42bb}\dot{\eta}_{g2} + \\
 & + \mu_{46bb}\dot{\chi}_2 + D_2 h_{02} \theta_2 + \lambda_{41bb}\ddot{\xi}_{g2} + \\
 & + \lambda_{43bb}\ddot{\zeta}_{g2} + \lambda_{45bb}\ddot{\psi}_2 + \mu_{41bb}\dot{\xi}_{g2} + \\
 & + \mu_{43bb}\dot{\zeta}_{g2} + \mu_{45bb}\dot{\psi}_2 + \lambda_{44ab}\ddot{\theta}_1 + \\
 & + \lambda_{42ab}\ddot{\eta}_{g1} + \lambda_{46ab}\ddot{\chi}_1 + \mu_{44ab}\dot{\theta}_1 + \\
 & + \mu_{42ab}\dot{\eta}_{g1} + \mu_{46ab}\dot{\chi}_1 + \lambda_{41ab}\ddot{\xi}_{g1} + \\
 & + \lambda_{43ab}\ddot{\zeta}_{g1} + \lambda_{45ab}\ddot{\psi}_1 + \mu_{41ab}\dot{\xi}_{g1} + \\
 & + \mu_{43ab}\dot{\zeta}_{g1} + \mu_{45ab}\dot{\psi}_1 = F_{B\theta 2} e^{-i\omega_k t};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (J_{yy2} + \lambda_{55bb})\ddot{\psi}_2 + \lambda_{51bb}\ddot{\xi}_{g2} + \\
 & + \lambda_{53bb}\ddot{\zeta}_{g2} + \mu_{55bb}\dot{\psi}_2 + \mu_{51bb}\dot{\xi}_{g2} + \\
 & + \mu_{53bb}\dot{\zeta}_{g2} + D_2 H_{02} \psi_2 - \rho g S_2 X_{f2} \zeta_{g2} + \\
 & + \lambda_{52bb}\ddot{\eta}_{g2} + \lambda_{54bb}\ddot{\theta}_2 + \lambda_{56bb}\ddot{\chi}_2 + \\
 & + \mu_{52bb}\dot{\eta}_{g2} + \mu_{54bb}\dot{\theta}_2 + \mu_{56bb}\dot{\chi}_2 + \\
 & + \lambda_{55ab}\ddot{\psi}_1 + \lambda_{51ab}\ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{53ab}\ddot{\zeta}_{g1} + \\
 & + \mu_{55ab}\dot{\psi}_1 + \mu_{51ab}\dot{\xi}_{g1} + \mu_{53ab}\dot{\zeta}_{g1} + \\
 & + \lambda_{52ab}\ddot{\eta}_{g1} + \lambda_{54ab}\ddot{\theta}_1 + \lambda_{56ab}\ddot{\chi}_1 + \\
 & + \mu_{52ab}\dot{\eta}_{g1} + \mu_{54ab}\dot{\theta}_1 + \\
 & + \mu_{56ab}\dot{\chi}_1 = F_{B\psi 2} e^{-i\omega_k t};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (J_{zz2} + \lambda_{66bb})\ddot{\chi}_2 + \lambda_{62bb}\ddot{\eta}_{g2} + \\
 & + \lambda_{64bb}\ddot{\theta}_2 + \mu_{66bb}\dot{\chi}_2 + \mu_{62bb}\dot{\eta}_{g2} + \\
 & + \mu_{64bb}\dot{\theta}_2 + \lambda_{61bb}\ddot{\xi}_{g2} + \lambda_{63bb}\ddot{\zeta}_{g2} + \\
 & + \lambda_{65bb}\ddot{\psi}_2 + \mu_{61bb}\dot{\xi}_{g2} + \mu_{63bb}\dot{\zeta}_{g2} + \\
 & + \mu_{65bb}\dot{\psi}_2 + \lambda_{66ab}\ddot{\chi}_1 + \lambda_{62ab}\ddot{\eta}_{g1} + \\
 & + \lambda_{64ab}\ddot{\theta}_1 + \mu_{66ab}\dot{\chi}_1 + \mu_{62ab}\dot{\eta}_{g1} + \\
 & + \mu_{64ab}\dot{\theta}_1 + \lambda_{61ab}\ddot{\xi}_{g1} + \lambda_{63ab}\ddot{\zeta}_{g1} + \\
 & + \lambda_{65ab}\ddot{\psi}_1 + \mu_{61ab}\dot{\xi}_{g1} + \\
 & + \mu_{63ab}\dot{\zeta}_{g1} + \mu_{65ab}\dot{\psi}_1 = F_{B\chi 2} e^{-i\omega_k t}
 \end{aligned}$$

где  $S_n$ -площади действующих ватерлиний;  $D_n$ -весовые водоизмещения судов,  $M_n$ -массы судов,  $h_{0n}, H_{0n}$  -поперечная и продольная метацентрические высоты ;  $J_{xxn}, J_{yy n}, J_{zz n}$  -



центральные моменты инерции первого и второго судов;  $X_{fn}$  -абсциссы центров тяжести площадей ватерлиний.

Входящие в систему (1) коэффициенты присоединенных масс и демпфирования  $\lambda_{ijAA}, \mu_{ijAA}, \lambda_{ijBB}, \mu_{ijBB}, \lambda_{ijAB}, \mu_{ijAB}, \lambda_{ijBA}, \mu_{ijBA}$  и возмущающие силы  $F_{Bi}$  определяются на основании трехмерной потенциальной теории по формулам, приведенным в работах авторов [2], [3]

Решение системы уравнений имеет следующий вид :

$$\begin{aligned} \xi_{gn} &= \xi_{g0n} \sin(\omega_k t + \delta_{\xi n}) \\ \eta_{gn} &= \eta_{g0n} \sin(\omega_k t + \delta_{\eta n}) \\ \zeta_{gn} &= \zeta_{g0n} \sin(\omega_k t + \delta_{\zeta n}) \\ \theta_n &= \theta_{0n} \sin(\omega_k t + \delta_{\theta n}) \\ \psi_n &= \psi_{0n} \sin(\omega_k t + \delta_{\psi n}) \\ \chi_n &= \chi_{0n} \sin(\omega_k t + \delta_{\chi n}), \\ n &= 1, 2 \end{aligned} \tag{2}$$

**2.Анализ результатов**

На основании изложенного были проведены расчеты амплитудно-частотных характеристик , имеющих место при совместной качке двух судов.

В целях апробации расчетов амплитудно-частотных характеристик качки были проведены сравнения результатов расчетов амплитуд совместной продольной качки двух вертикальных цилиндров и совместной качки параллелепипеда и вертикального цилиндра с расчетами Goo [ 4 ]. Результаты сравнений амплитудно-частотных характеристик продольно-горизонтальной и вертикальной качки объектов приведены на рис.1 и 2

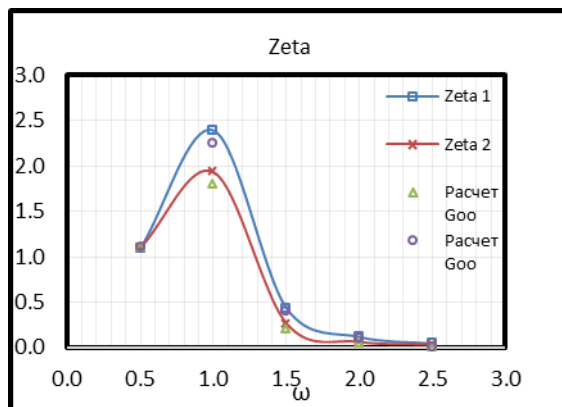
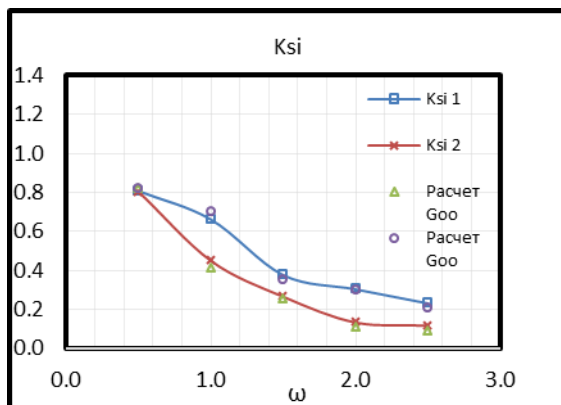
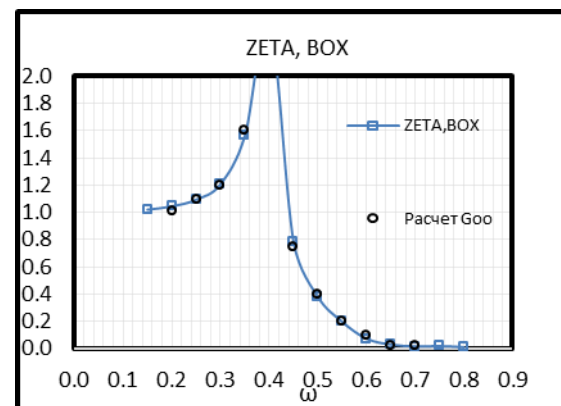
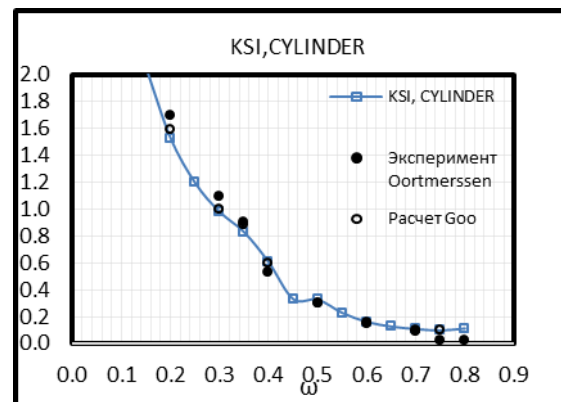
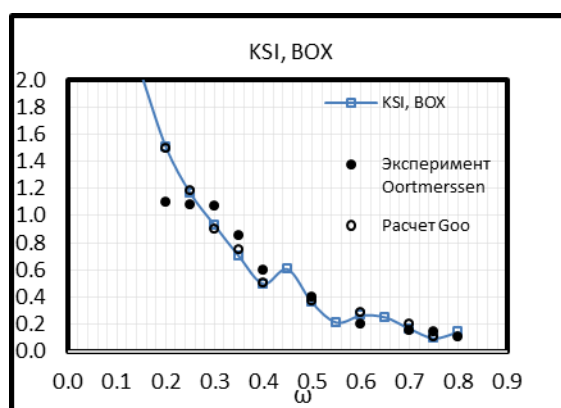


Рис.1. Значения амплитудно-частотных характеристик при совместной продольной качке двух цилиндров



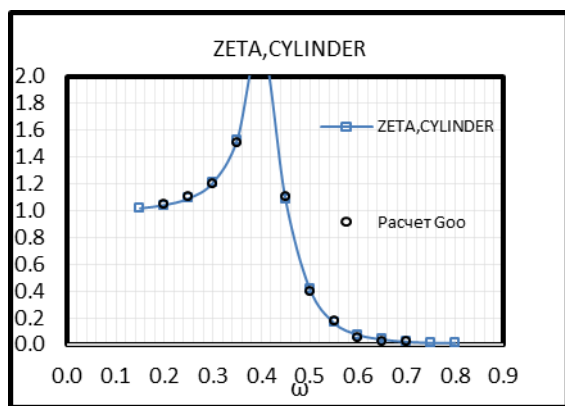


Рис.2. Значения амплитудно-частотных характеристик при совместной продольной качке параллелепипеда и вертикального цилиндра

Из приведенных сравнений расчетов амплитудно-частотных характеристик видно полное согласование результатов.

Определение амплитудно-частотных характеристик при совместной качке различных пар судов производилось на основании решения системы дифференциальных уравнений для курсовых углов: 45,90,135,225,270,315,180.

Проведенный анализ полученных результатов показал, что при расположении обоих судов лагом наблюдается наибольшее влияние гидродинамического взаимодействия. Для судна, находящегося с наветренной стороны, имеет место значительное увеличение резонансных амплитуд вертикальной и бортовой качки при уменьшении расстояния между судами. Так, при совместной качке лихтеровоза «Алексей Косыгин» и ледокола «Севморпуть» при курсовом угле  $\beta=90$  с наветренной стороны оказывается ледокол. При расстоянии между судами  $d=10$  м безразмерные амплитуды вертикальной качки в зоне ее резонанса в 1.4 раза больше амплитуд, полученных для изолированного судна, а безразмерные амплитуды бортовой качки в 3 раза больше соответствующих амплитуд при качке изолированного судна (рис.3). При совместной качке той же пары судов на курсовом угле  $\beta=270$  с наветренной стороны оказывается лихтеровоз «Алексей Косыгин». Для него амплитуды вертикальной и бортовой качки в зоне их резонансов больше соответствующих амплитуд для изолированного судна в 1,7 и 4 раза соответственно. В зарезонансной зоне амплитуды вертикальной и бортовой качки в большинстве случаев совпадают с соответствующими амплитудами для изолированного судна независимо от расстояния между судами.

Для амплитудно-частотной характеристики поперечно-горизонтальной качки судна, расположенного с наветренной стороны характерно наличие дополнительных резонансных режимов, имеющих место на частотах, соответствующих собственным частотам бортовой качки. Например, для ледокола «Севморпуть» проис-

ходит увеличение амплитуд поперечно-горизонтальной качки в 2,5 раза на частоте  $\omega=0,5$ , соответствующей резонансу бортовой качки (рис.3). На остальном диапазоне частот амплитуды поперечно-горизонтальной качки совпадают с амплитудами, соответствующими случаю качки изолированного судна.

Для судна, расположенного с подветренной стороны при совместной качке лагом, характерно значительное уменьшение амплитуд вертикальной и поперечно-горизонтальной качки в области частот  $\omega>0,6$  по сравнению с амплитудами для изолированного судна. Уменьшение амплитуд связано с уменьшением значений возмущающих сил в данной области частот [3]. Так, при совместной качке лихтеровоза и ледокола при частоте  $\omega=0,8$  и расстоянии  $d=10$  м между бортами происходит четырехкратное уменьшение амплитуд вертикальной качки для лихтеровоза при курсовом угле  $\beta=90$  и двукратное уменьшение для ледокола при  $\beta=270$  (рис.3).

Резонансные амплитуды бортовой качки увеличиваются при уменьшении расстояния и сдвигаются в область больших частот. При этом, для одного и того же судна амплитуды бортовой качки больше в случае его расположения с наветренной стороны.

Характерные результаты расчетов амплитудно-частотных характеристик на косом волнении приведены на рис.4. При этом в случае встречного косоугольного волнения  $\beta=135$  с наветренной стороны был расположен сухогруз «Стахановец Котов», а в случае попутного косоугольного волнения  $\beta=45$  – «буксир».

Из приведенных результатов видно, что в меньшей степени изменение расстояния между судами при качке на косом волнении влияет на дополнительные виды качки. Амплитудно-частотные характеристики продольно-горизонтальной, поперечно-горизонтальной качки и рысканья для обоих судов практически полностью совпадают с амплитудно-частотными характеристиками, полученными для них по отдельности (рис.4).

Значительное влияние гидродинамического взаимодействия проявляется для основных видов качки обоих судов.

Происходит увеличение резонансных амплитуд бортовой качки и их сдвиг в область больших частот при уменьшении расстояния между судами.

При качке буксира и сухогруза «Стахановец Котов» на расстоянии 10 м между бортами и курсовом угле  $\beta=135$  резонансные амплитуды бортовой качки буксира увеличиваются в 12,3 раза, а сухогруза в 16 раз по сравнению с резонансными амплитудами качки изолированных судов (рис.4). При том же расстоянии и

курсовом угле  $\beta=45$  резонансные амплитуды бортовой качки буксира увеличиваются в 9 раз, а сухогруза в 11 раз, что связано с сильным влиянием гидродинамического взаимодействия.

Для амплитудно-частотных характеристик вертикальной и килевой качки на косом волнении из-за взаимодействия всех двенадцати колебаний характерно наличие дополнительных резонансных режимов, имеющих место на частотах, соответствующих собственным частотам бортовой и вертикальной качки, а также наличие собственных многочисленных резонансов на всем диапазоне частот, положение которых определяется выражением:

$$\frac{\omega^2}{g} d = n\pi, \quad n = 1, 2, 3.. \quad (3)$$

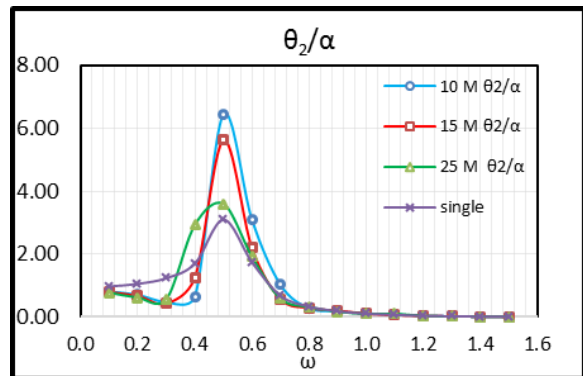
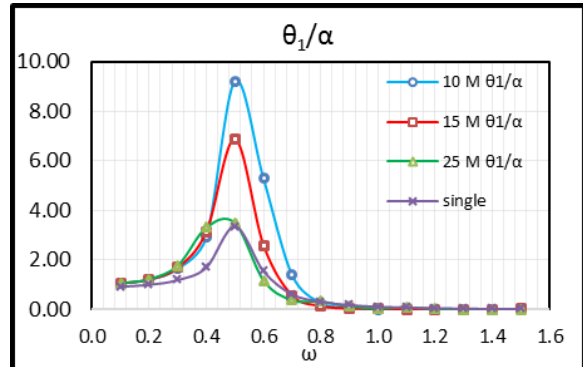
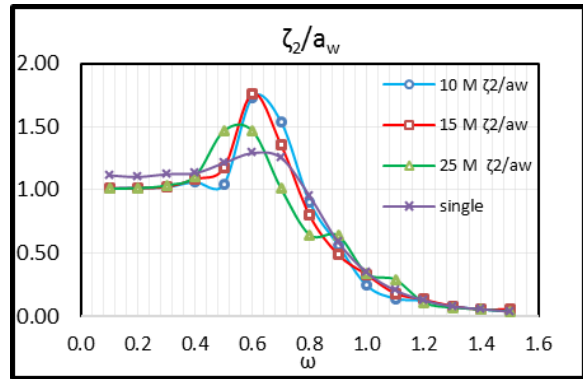
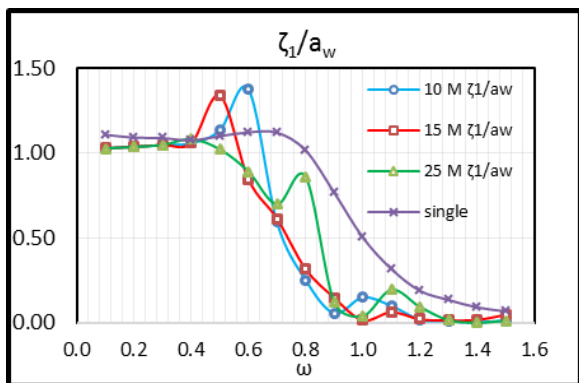
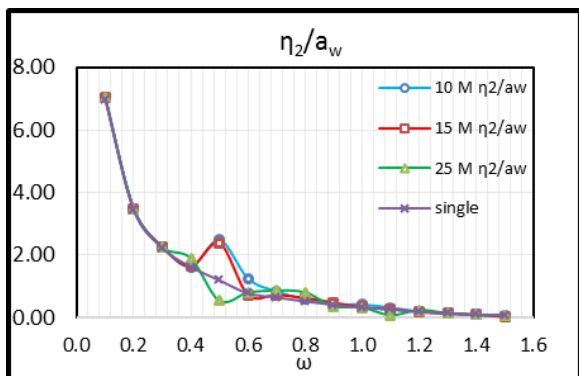
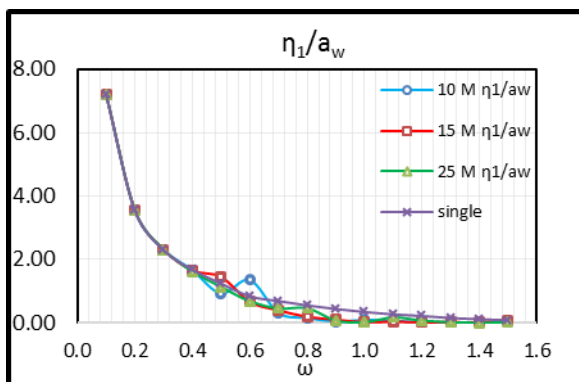
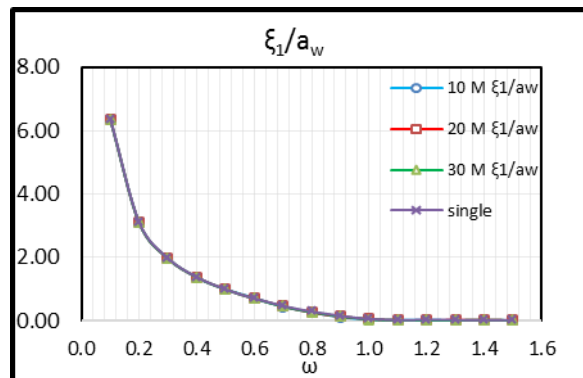
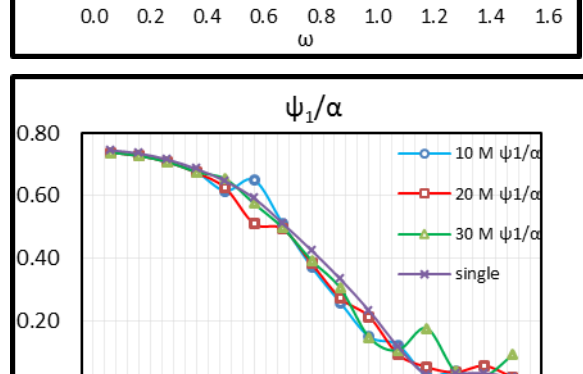
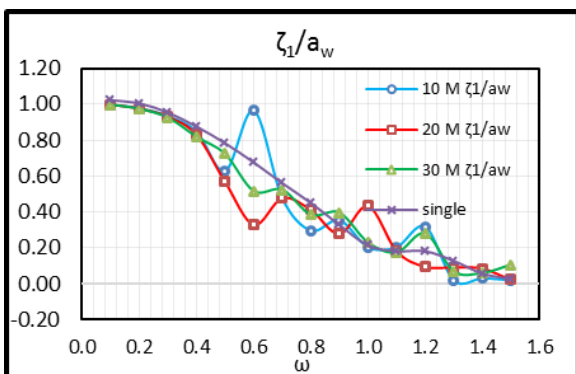
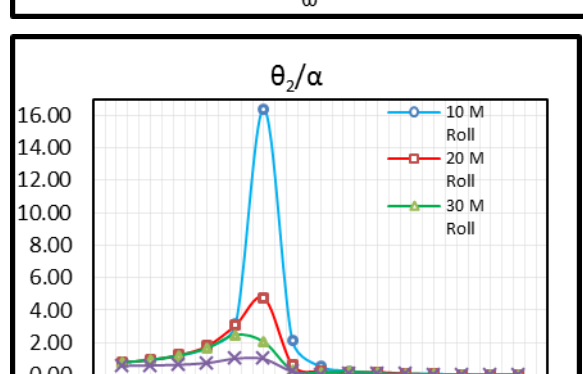
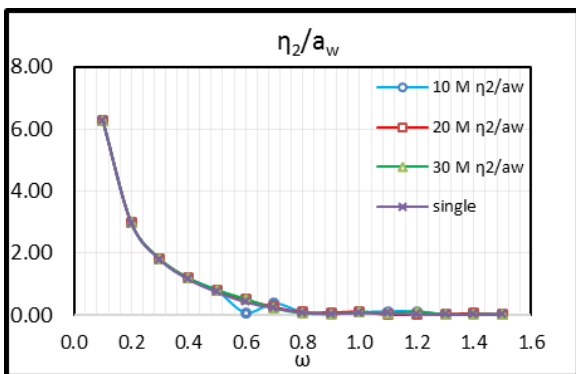
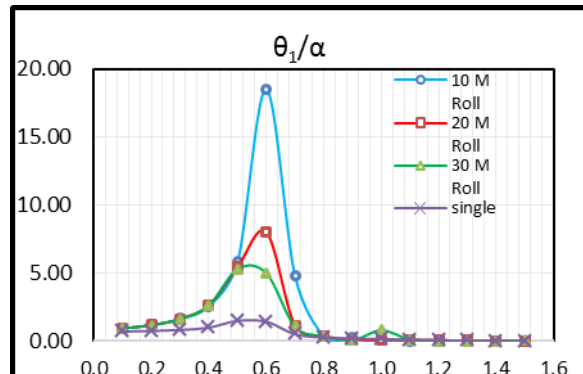
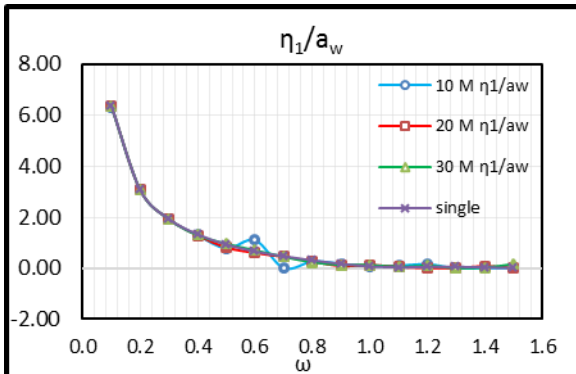
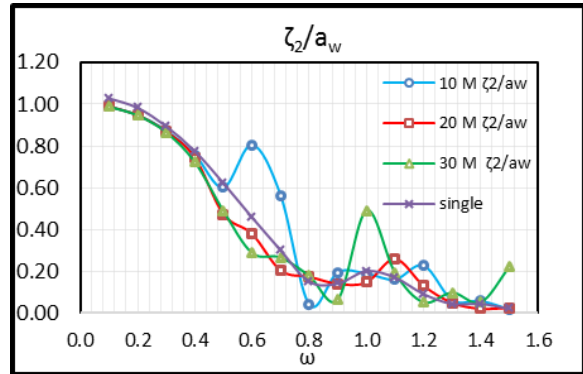
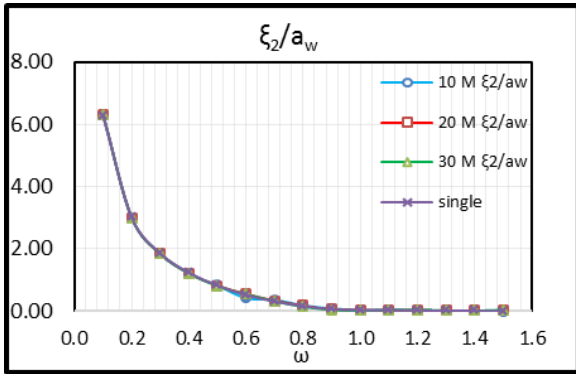


Рис.3. Значения амплитудно-частотных характеристик при совместной качке параллельно расположенных лихтеровоза Алексей Косыгин и ледокола Севморпуть при глубине  $h=20\text{м}$  и курсовом угле  $\beta=90$  в зависимости от изменения расстояния между судами.





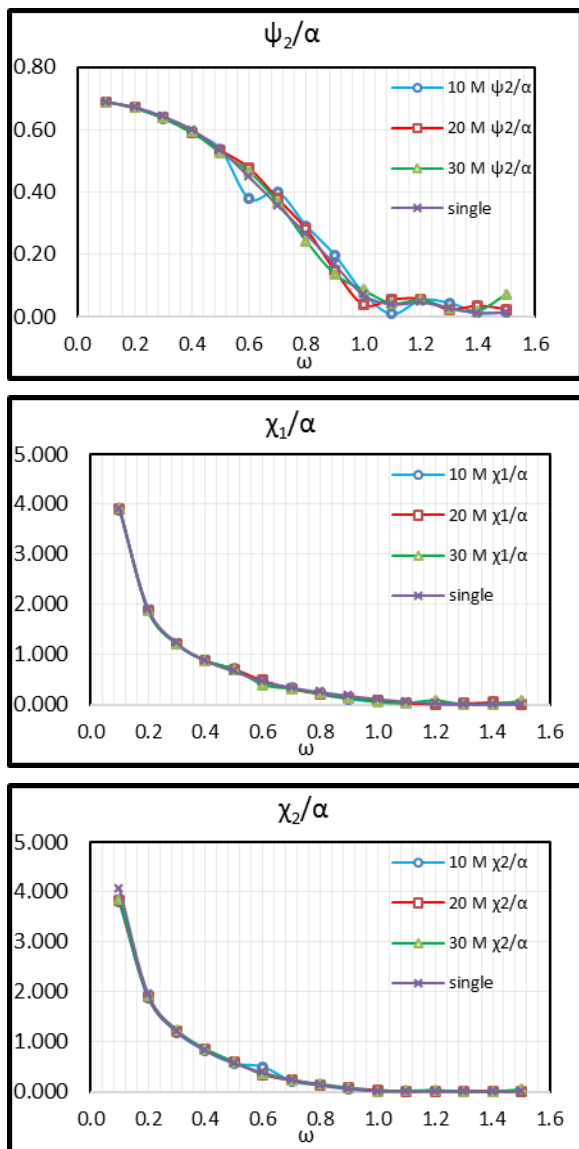


Рис.4. Значения амплитудно-частотных характеристик при совместной качке параллельно расположенных буксира и сухогруза Стахановец Котов при глубине  $h=12$  м и курсовом угле  $\beta=135$  в зависимости от изменения расстояния между судами

Таким образом, увеличение расстояния между судами приводит к смещению максимумов амплитудно-частотных характеристик в область низких частот (рис.4).

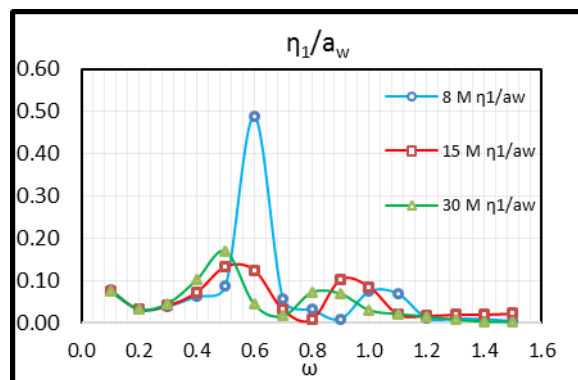
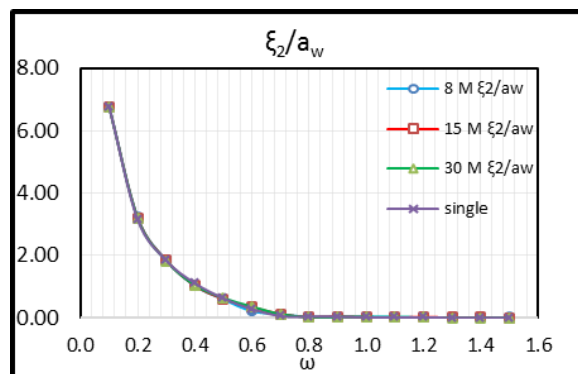
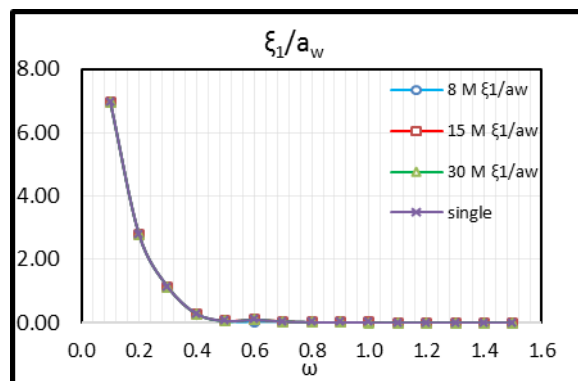
Анализ результатов расчетов амплитуд совместной качки двух судов на встречном волнении показал, что амплитудно-частотные характеристики продольно-горизонтальной и килевой качки как первого так и второго судна практически не зависят от гидродинамического взаимодействия и совпадают с соответствующими амплитудно-частотными характеристиками, полученными для изолированных судов (рис.5). В случае вертикальной качки на встречном волнении уменьшение расстояния между

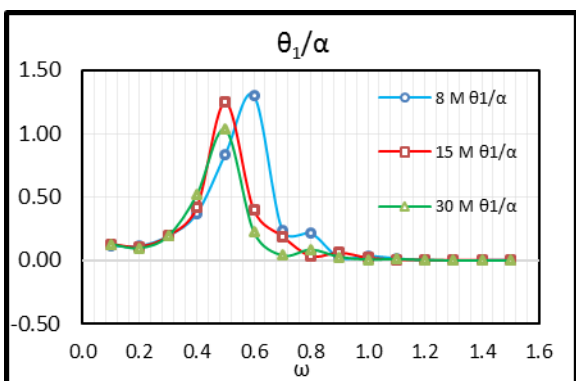
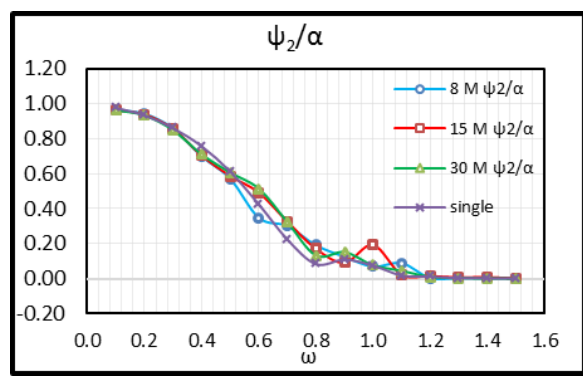
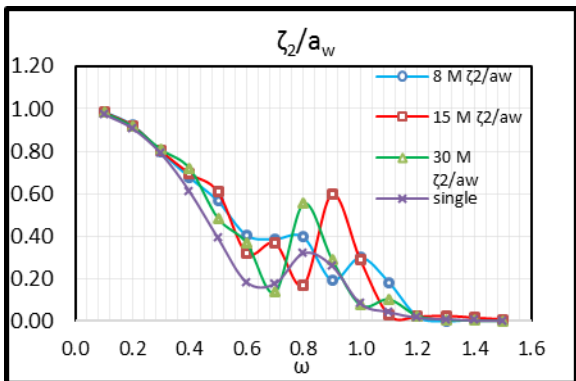
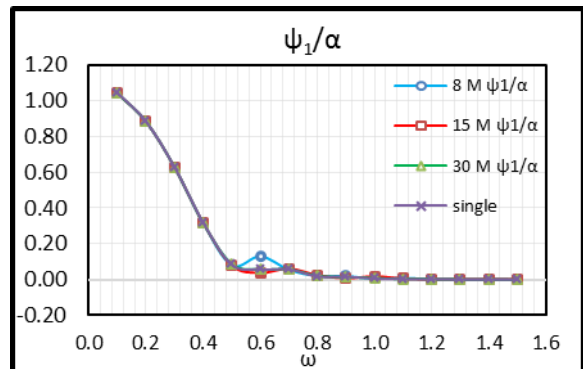
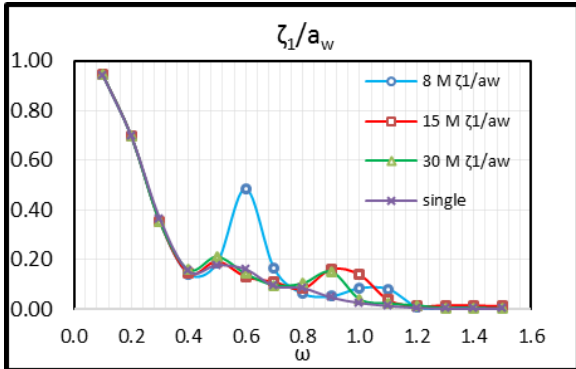
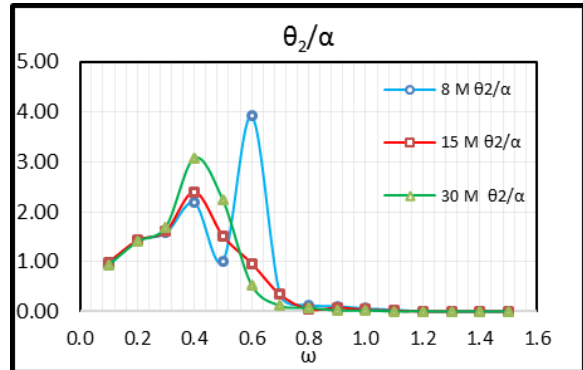
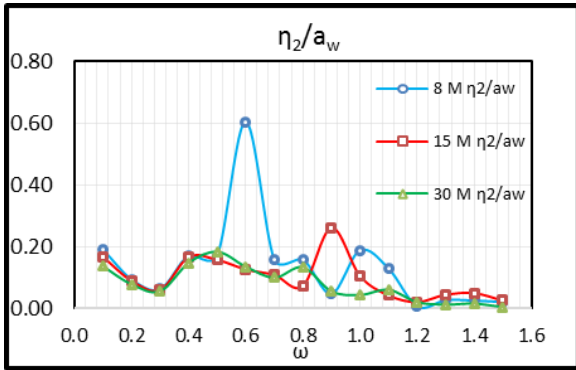
судами приводит к увеличению ее амплитуд в зоне частот  $0,4 < \omega < 1,2$ .

Отличительной характеристикой совместной качки судов на встречном волнении является появление поперечно-горизонтальных, бортовых колебаний и рысканья, отсутствующих в случае качки изолированных судов. При этом амплитуды всех перечисленных колебаний увеличиваются при уменьшении расстояния между судами, а резонансные амплитуды бортовой качки смещаются в область высоких частот.

При этом безразмерные амплитуды поперечно-горизонтальной качки обоих судов в области частот  $0,4 < \omega < 1,2$  сопоставимы с амплитудами вертикальной качки, а амплитуды рысканья с амплитудами килевой качки (рис.5).

При бесконечно большом расстоянии между судами амплитуды данных видов колебаний стремятся к нулевым значениям.





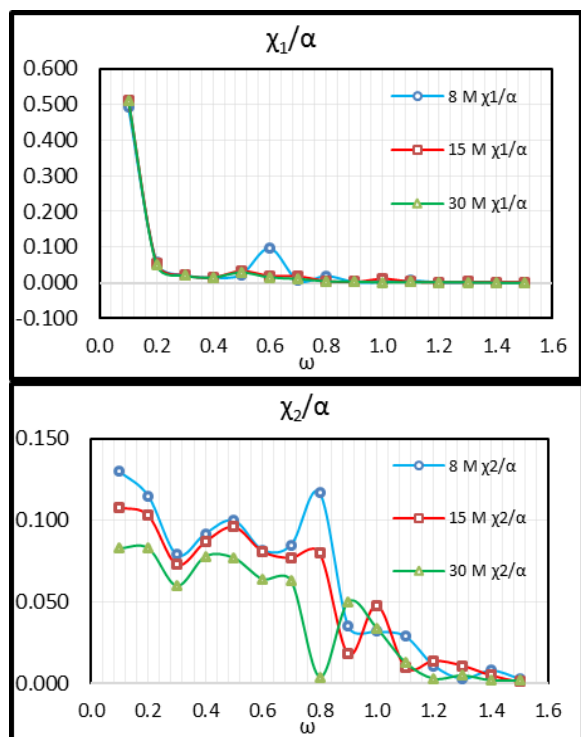


Рис.5. Значения амплитудно-частотных характеристик при совместной качке параллельно расположенных лихтеровоза Алексей Косыгин и сухогруза Новгород при глубине  $h=20$ м и курсовом угле  $\beta=180$  в зависимости от изменения расстояния между судами.

Анализ результатов расчетов амплитудно-частотных характеристик качки при последовательном расположении судов на различных

курсовых углах показал незначительное влияние гидродинамического взаимодействия и изменения расстояния между судами на амплитуды вертикальной, бортовой и килевой качки второго судна, расположенного сзади. Таким образом, в случае последовательно расположения судов при практических расчетах совместной качки учет изменения расстояния можно пренебречь и рассматривать качку каждого судна по отдельности.

### Выводы

Проведенное исследование влияния изменения расстояния между судами на амплитуды качки показало, что :

1. Наибольшие амплитуды качки имеют место при расположении обоих судов лагом и параллельно друг другу. При этом, в наилучших условиях оказывается меньшее судно, расположенное с наветренной стороны.
2. При совместной качке имеет место взаимодействие всех 12 колебаний обоих судов, что приводит к возникновению **ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ ВСЕХ ВИДОВ КАЧКИ.**
3. На встречном волнении указанная взаимосвязь колебаний вызывает появление поперечно-горизонтальной, бортовой качки и рысканья. Амплитуды перечисленных видов колебаний увеличиваются при уменьшении расстояния между судами.

### Литература

1. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Качка судов на морском волнении. Л., Судостроение, 1969.
2. Семенова В.Ю., Аунг Мью Тхант (2015). Определение гидродинамических коэффициентов присоединенных масс и демпфирования при совместной качке двух судов. Морские интеллектуальные технологии, N4(30), т.1, стр.9-15
3. Семенова В.Ю., Аунг Мью Тхант (2016). Определение возмущающих сил, возникающих при совместной качке двух судов на мелководье. Морские интеллектуальные технологии, N2(32), т.1, стр.27-34
4. Goo J., Yoshida K.(1989) Hydrodynamic interaction between multiple three dimensional bodies of arbitrary shape in waves. Journal of the society of Naval Architects of Japan, 165,pp.193-2024.

### References

1. Boroday I.K., Netsvetaev Yu.A. Kachka sudov na morskoy volnenii. Leningrad, «Sudo-stroenie», 1969.
2. Semenova V.Yu., Aung M'o Tkhant (2015). Opredelenie gidrodinamicheskikh koeffitsientov prisoedinennykh mass i dempfirovaniya pri sovmestnoy kachke dvukh sudov. Morskie intellektual'nye tekhnologii, N4(30), t.1, str.9-15
3. Semenova V.Yu., Aung M'o Tkhant (2016). Opredelenie vozmushchayushchikh sil, voznikayushchikh pri sovmestnoy kachke dvukh sudov na melkovod'e. Morskie intellektual'nye tekhnologii, N2(32), t.1, str.27-34
4. Goo J., Yoshida K.(1989) Hydrodynamic interaction between multiple three dimensional bodies of arbitrary shape in waves. Journal of the society of Naval Architects of Japan, 165,pp.193-2024.

УДК 629.5

## ФОРМИРОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ПОГОДЫ С УЧЕТОМ НЕРЕГУЛЯРНОСТИ ВЕТРА И ВОЛН

**Борисов Рудольф Васильевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теории корабля  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
тел. 89112547668, e-mail: rvborisov@mail.ru

**Лузянин Александр Альфредович**

кандидат технических наук, доцент кафедры теории корабля  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
тел. 89213092290, e-mail: aaluzyanin@rambler.ru

### Аннотация

При динамическом воздействии ветровой нагрузки обычно рассматривается отношение предельного выдерживаемого судном кренящего момента, называемого иногда минимальным опрокидывающим моментом, к расчетному кренящему моменту от давления ветра. Это отношение  $K = \frac{M_{ОПР}}{M_{КР}}$

называется коэффициентом запаса остойчивости или критерием погоды, а также основным критерием.

Если критерий погоды учитывает действие только ветровой нагрузки, то минимальный опрокидывающий момент должен определяться, исходя из восстанавливающих способностей судна на тихой воде. При известных упрощениях, широко используемых в практике нормирования остойчивости, это сводится к элементарным построениям на диаграмме статической или динамической остойчивости.

Оценка динамической остойчивости судна существенно осложняется, если в критерии погоды учитывается кренящее действие не только ветровой нагрузки, но и набегающих волн. Суммарный эффект воздействия кренящих моментов на судно зависит от целого ряда факторов: от характера набегающих волн, положения судна по отношению к волнению, степени динамичности ветровой нагрузки, сдвига по фазе между кренящим моментом от давления ветра и возмущающим моментом волнения.

Морские волны редко бывают регулярными (мертвая зыбь), и, как правило, имеют нерегулярный характер (ветровые волны). Волнение может распространяться под разными курсовыми углами по отношению к направлению хода судна, и в зависимости от этого будут существенно изменяться элементы качки. Ветровая нагрузка может подействовать на судно в момент либо когда оно находится в положении равновесия, либо когда оно имеет крен от качки навстречу ветру, либо когда оно имеет крен от качки в направлении скорости ветра. Характер приложения ветровой нагрузки тоже может различаться: порыв ветра может быть некоторой добавкой к стабильной составляющей воздушного потока, имеющей постоянную среднюю скорость, но он может возникнуть и после кратковременного затишья, так что скорость ветра быстро возрастет от нуля до максимального значения. В зависимости от этого будет разным не только ветровой крен судна, но и суммарный эффект кренящего действия ветра и волн.

При построении критерия погоды отмеченные факторы могут быть учтены различным образом, в разной степени и в разных комбинациях, однако всегда стараются удовлетворить очевидным условиям: выбранная комбинация воздействия ветра и волн должна быть, с одной стороны, достаточно тяжелой в отношении остойчивости, а с другой, - вполне вероятной в смысле возможности ее возникновения в процессе эксплуатации. Эти условия в известной степени противоречивы, и обычно приходится искать компромиссное решение, ориентируясь как на физическую сторону процесса, так и на опыт эксплуатации судов, в особенности на аварийную статистику. Естественно, что в разных странах они могут оказаться различными.

**Ключевые слова:** угол крена, критерий погоды, кренящий момент, восстанавливающий момент, амплитуда бортовой качки, вероятность опрокидывания.

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF THE DYNAMIC WATERLINE ON THE STABILITY OF THE ESCORT TUGS

**Borisov Rudolf Vasil'evich**

Dr.Sci.Tech., the professor of department of theory of the ship ,



State marine technical university of Saint-Petersburg  
 Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
 tel. 89112547668, e-mail: rvborisov@mail.ru

**Luzyanin Aleksandr Al'fredovich**

candidate of technical science, assistant professor of department of theory of the ship ,  
 State marine technical university of Saint-Petersburg  
 Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
 tel. 89213092290, e-mail: aaluzyanin@rambler.ru

**Abstracts**

During the dynamic impact of the wind load the ratio of extremely withstand heeling moment of the ship, sometimes referred to as the minimum overturning moment, to the calculated heeling moment from wind pressure is usually considered. This ratio  $K = \frac{M_{OIP}}{M_{KP}}$  is called the safety factor or the stability criterion

of the weather, as well as the basic criterion.

If the weather criterion takes into account the action of wind load only, the minimum overturning moment should be based on restoring capacity of the ship in calm water. Under certain simplifications, which are widely used in the practice of rationing of stability, it comes down to the basic constructions on the diagram of static or dynamic stability.

The Assessment of dynamic stability of the ship is significantly complicated if the criterion of the weather takes into account not only the heeling from wind load, but from the incoming waves also. The total effect of the heeling moments on the ship depends on several factors: the nature of incoming waves, location of the ship relative to the excitement, the degree of dynamic wind load, the phase shift between heeling moment from wind pressure and excited moment of the waves.

Sea waves are rarely regular (dead swell), and usually have an irregular nature (wind waves). The excitement may extend at different angles relative to the direction of travel of the ship, and depending on that will significantly change the elements of ship oscillations. Wind load can act on the ship at the time of its equilibrium or when it has a heel from rolling against the wind, or when it has the heel from rolling in the direction of the wind speed. Nature of wind loads can also vary: a gust of wind can be some addition to a stable component of the air flow with a constant average speed, but it can occur after a brief lull, so the wind speed will increase rapidly from zero to a maximum value. Depending on it will be different not only wind the wind heel of the ship, but the cumulative effect of heeling effect of wind and waves.

When building a criterion of weather the above-mentioned factors can be taken into account in different ways, in different degrees and in different combinations, but always trying to satisfy the obvious conditions: the selected combination of impact of wind and waves should be, on the one hand sufficiently hard for stability and on the other, - it is probable in the sense that it occurs during operation. These conditions are to some extent contradictory, and it is usually necessary to seek a compromise solution, focusing both on the physical side of the process and the experience of operating ships, particularly for emergency statistics. Naturally, in different countries, they can be different.

**Key words:** escort towing, tugs, static stability, dynamic water-line, towing tank.

Задача об определении вероятности опрокидывания судна, штормующего в определенном районе мирового океана, подразделяется на две. Первая задача заключается в определении вероятности нахождения судна в условиях ветра с заданной средней скоростью и волнения с заданной характерной высотой волн. Оно осуществляется на основании гидрометеорологических данных о частоте наблюдения тех или иных условий ветро-волнового режима в заданном морском районе. Поскольку наблюдения за ветром и волнением проводятся обычно через **каждые шесть часов**, решение первой задачи дает приближенное значение вероятности такого события: «судно, оказавшееся в заданном водном бассейне, безразлично, в какое время года и в каком районе, встретило данные условия ветра и волнения

и, пребывая в море в течение **шести часов**, находится в этих условиях.

В существующих нормах ИМО остойчивость по критерию погоды  $K$  считается достаточной, если при указанном ниже условном действии ветра и волнения выполняется требование к критерию. При этом считается, что:

1. Судно находится под воздействием ветра постоянной скорости, направленного перпендикулярно к его диаметральной плоскости, которому соответствует плечо ветрового кренящего момента  $l_{w1}$  (рис.1);

2. От статического угла крена  $\theta_0$ , вызванного постоянным ветром и соответствующего первой точке пересечения горизонтальной прямой  $l_{w1}$  и кривой восстанавливающих плеч  $l(\theta)$ , под действием волн судно кренился на наветренный борт на угол, равный амплитуде бортовой качки  $\theta_1$ ;

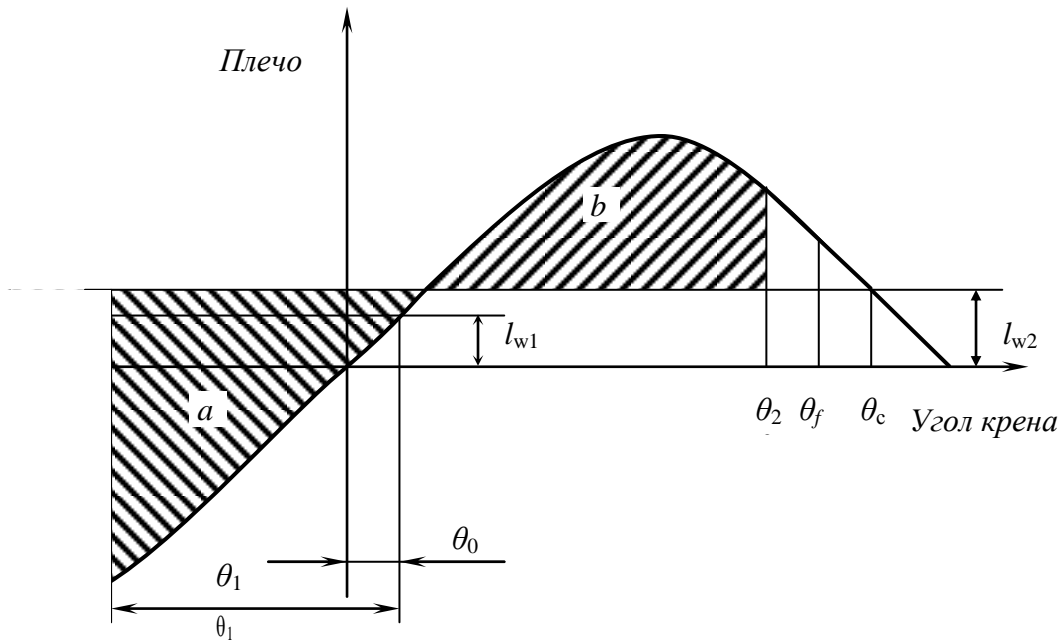


Рис. 1.

3. На накренное судно динамически действует порыв ветра, которому соответствует плечо кренящего момента  $l_{w2}$ ;

4. Вычисляются и сравниваются площади  $a$  и  $b$ , заштрихованные на рис.1. Площадь  $b$  ограничена кривой  $l(\theta)$  восстанавливающих плеч, горизонтальной прямой, соответствующей кренящему плечу  $l_{w2}=1,5l_{w1}$ , и углом крена  $\theta_f = 50^\circ$ , либо углом крена  $\theta_c$ , соответствующим точке второго пересечения прямой  $l_{w2}$  с кривой восстанавливающих плеч - в зависимости от того, какой из этих углов меньше. Площадь  $a$  ограничена кривой восстанавливающих плеч, прямой  $l_{w2}$  и углом крена, равным  $\theta_0 - \theta_1$ ;

5. Остойчивость судна по критерию погоды  $K = b/a$  считается достаточной, если площадь  $b$  равна или больше площади  $a$ , т.е.  $K \geq 1$ , а угол крена от статического действия ветра  $\theta_{w1}$  не превышает  $16^\circ$  или угла равного 0.8 угла входа в воду открытой палубы, смотря по тому, который из них меньше.

6. Характеры динамически приложенных порывов и амплитуд качки считаются детерминированными.

Этот критерий или удовлетворяется, или не удовлетворяется. Он не учитывает возможные особенности конкретного района плавания с конкретными ветровыми и волновыми условиями. Его трудно корректировать даже с использованием экспериментальных результатов. Поэтому определение уровня безопасности при использовании критерия затруднено.

В настоящей работе рассматривается совместное действие ветра и волн с учетом их нерегулярности. При этом используются спектры фактического ветра и волн, а средняя скорость ветра является связующим звеном между спектрами.

Действие ветра моделируется двумя составляющими: действием средней постоянной скоро-

сти ветра и колебаниями скорости ветра (порывы). Основная идея состоит в том, что постоянно действующий ветер вызывает дрейф с постоянной скоростью, так как будет наблюдаться равенство гидродинамической силы, действующей на подводную часть судна при качке, и противоположной по направлению силы действия среднего ветра. При этом предполагается, что изменение сил от действия порывов ветра по времени происходят быстро, так что у гидродинамических реакций, обусловленных качкой не хватает времени, чтобы полностью развиться, и таким образом, ими пренебрегают.

Боковой ветер дует со скоростью  $w(t)$ .

Чтобы определить постоянный кренящий момент и момент от порывов ветра, проводится линеаризация скоростного напора воздуха.

Давление ветра  $p$ , связанное со скоростью потока  $w(t)$ , будет равно

$$p = \frac{1}{2} \rho_{\text{возд}} w^2(t), \tag{1}$$

где:  $\rho_{\text{возд}}$  - плотность воздуха.

Скорость ветра  $w(t)$  определяется в виде суммы средней скорости ветра  $\bar{w}$  и мгновенной скорости ветра колебания  $\delta w(t)$ , а именно:

$$w(t) = \bar{w} + \delta w(t). \tag{2}$$

Если пренебречь составляющими второго порядка, на основе предположения, что коэффициент изменчивости поля ветра мал, линеаризованное выражение давления ветра получится равным:

$$p(t) = \bar{p} + \delta p(t), \tag{3}$$

где:  $\bar{p}$  - постоянное давление ветра, равное

$$\bar{p} = \frac{1}{2} \rho_{\text{возд}} \bar{w}^2; \tag{4}$$

$\delta p(t)$  - переменное давление ветра, равное  $\delta p(t) \approx \rho_{\text{возд}} \bar{w} \delta w(t)$ .

Тогда горизонтальная сила от действия ветра будет равна

$$F_w(t) = F_{0w} + \delta F_w(t), \tag{6}$$

где:  $F_{0w}$  - постоянная боковая сила (она же средняя)

$$F_{0w} = \frac{1}{2} \rho_{\text{возд}} \bar{w}^2 C_y A_n \quad (7)$$

а  $\delta F_w(t)$  - переменная

$$\delta F_w(t) \approx \rho_{\text{возд}} \bar{w} \delta w(t) C_y A_n \quad (8)$$

В выражениях (7) и (8)  $C_y$  - коэффициент аэродинамического сопротивления, зависящий от наличия надстроек, развитости надводных конструкций и их формы и т.д.,  $A_n$  - площадь парусности (площадь проекций всех надводных конструкций на ДП).

Постоянный кренящий момент от ветра  $M_{w1}$  можно вычислить по формуле

$$M_{w1} = F_{0w}(H_n + H_{z0}) = \frac{1}{2} C_y \rho_{\text{возд}} \bar{w}^2 A_n (H_n + H_{z0}), \quad (9)$$

где  $H_{z0}$  - отстояние центра гидродинамического давления от ватерлинии вниз (при статическом действии ветра он обычно принимается равным половине осадки  $T/2$ ),  $H_n$  - отстояние центра парусности от ватерлинии. т.е. считается, что центр давления в предположении о равномерном распределении по высоте ветровой нагрузки совпадает с центром парусности.

Величина среднего ветрового момента предполагается независимой от мгновенного угла крена при качке.

Плечо постоянного кренящего момента будет равно

$$l_{w1} = \frac{M_{w1}}{\Delta} = \frac{1}{2\Delta} C_y \rho_{\text{возд}} \bar{w}^2 A_n (H_n + H_{z0}). \quad (10)$$

Здесь  $\Delta$  - водоизмещение судна.

Из обычного уравнения статики можно получить постоянный угол крена  $\theta_0$ , относительно которого при воздействии волн происходит качка судна

$$\Delta l(\theta) = M_{w1}, \quad (11)$$

Угол крена  $\theta_0$  удобнее получать графически, как это показано на рис.1, но можно определять аналитическим путем, предварительно проведя аппроксимацию  $l(\theta)$ .

Переменный кренящий момент вычисляется следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta M_w(t) &\approx \delta F_w(t)(d + H_n - z_g) = \\ &= C_y \rho_{\text{возд}} \bar{w} \delta w(t) A_n (d + H_n - z_g). \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь  $d$  - осадка.

При этом предполагается, что изменение сил от действия порывов ветра по времени происходят быстро, так что гидродинамические реакции не успевают развиваться. Если бы использовался подход «масштаба медленного времени», плечо силы от порывистости можно было бы считать равным плечу силы для постоянного ветра, т. е.  $H_n + H_{z0}$ .

Плечо переменного кренящего момента можно определить по формуле

$$l_{w2} = l_{w1} + \delta l_{w2}, \quad (13)$$

где  $\delta l_{w2}$  - дополнительное плечо кренящего момента, возникающее именно от порывов ветра

$$\delta l_{w2}(t) = \frac{\delta M_w(t)}{\Delta} = \frac{1}{\Delta} C_y \rho_{\text{возд}} \bar{w} \delta w(t) A_n (d + H_n - z_g) \quad (14)$$

Порывистость ветра, т. е. колебания скорости ветра около среднего значения  $\bar{w}$ , является нулевым средним гауссовским процессом, который

можно охарактеризовать во временной/частотной области соответствующим спектром порывов  $S_w(\omega)$ . Он может принимать различные формы в зависимости от типа ветра, от средней скорости в географической зоне, от шероховатости местности и т.д. В компактном виде он приводится в выражении

$$S_w(\omega) = 4K^* \frac{\bar{w}^2}{\omega} \frac{X_D^2}{(1+X_D^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (15)$$

где  $K^* = 0,003$  и  $X_D = 600 \frac{\omega}{\pi \bar{w}}$  - параметры спектра [7].

В соответствии с процедурой линеаризации давления, описанной выше, спектр момента линеаризованных колебаний от ветра может быть получен в форме:

$$S_{\delta M_w}(\omega) = [C_y \rho_{\text{возд}} \bar{w} \delta w A (d + H_n - z_g)]^2 S_w(\omega). \quad (16)$$

При этом не принимаются во внимание эффект некоторой пространственной неравномерности поля скоростей ветра и эффект неустойчивости процесса.

Учитывая (14), спектральную плотность для плеча переменного ветрового момента  $\delta l_{w2} = (t)$  можно записать в виде:

$$S_{\delta l_{w2}}(\omega) = [\rho_{\text{возд}} \bar{w} C_y A_n (d + H_n - z_g)]^2 \frac{S_w(\omega)}{\Delta^2}. \quad (17)$$

С помощью  $S_{l_{w2}}(\omega)$  может быть получена дисперсия

$$D_{\delta l_{w2}} = \int_0^{+\infty} S_{\delta l_{w2}}(\omega) d\omega. \quad (18)$$

Зная дисперсию, можно с заданной обеспеченностью  $\alpha_{l_{w2}}$  получить плечо  $\delta l_{w2}$

$$\delta l_{w2} = \alpha_{l_{w2}} \sqrt{D_{\delta l_{w2}}}. \quad (19)$$

Уравнение бортовой качки корабля при действии волн, используемое обычно при нормировании устойчивости в общем случае моделируется нелинейным уравнением

$$(J_x + \lambda_{44}) \ddot{\theta} + v_{44}(\dot{\theta}) + \Delta l(\theta) = M_g(t), \quad (20)$$

где  $J_x$  - момент инерции массы судна;

$\lambda_{44}$  - момент инерции присоединенных масс;

$v_{44}(\dot{\theta})$  - нелинейный коэффициент демпфирования;

$M_g(t)$  - возмущающий момент от волн.

Если колебания судна при качке происходят около нулевого начального угла, диаграмму статической устойчивости линеаризуют, представив диаграмму в следующем виде:

$$l(\theta) = \left. \frac{dl(\theta)}{d\theta} \right|_{\theta=0} \theta = h_0 \theta. \quad (21)$$

В окрестности  $\theta_0$  диаграмму статической устойчивости можно линеаризовать аналогичным образом

$$l(\theta) = \left. \frac{dl(\theta)}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_0} (\theta - \theta_0) = h_{\theta_0} (\theta - \theta_0) = h_{\theta_0} \vartheta, \quad (22)$$

где:  $h_{\theta_0}$  - обобщенная метacentрическая высота при угле  $\theta_0$ ;

$$\vartheta = (\theta - \theta_0) \quad (23)$$

относительный угол крена.

В общем случае демпфирование имеет нелинейный характер

$$v_{44}(\dot{\theta}) = v_{44} \dot{\theta} + W_{44} \dot{\theta} |\dot{\theta}| + \dots,$$

но обычно для него применяют линеаризацию, поэтому в уравнение качки можно подставить

$v_{44}(\dot{\theta}) = v_{44}\dot{\theta}$ . В окрестности  $\theta_0$  будет иметь место следующее выражение:

$$v_{44}(\dot{\theta}) = v_{44\theta_0}\dot{\theta}. \quad (24)$$

С учетом (22), (23) и (24) линеаризованное уравнение качки под действием волн в относительных координатах можно записать в виде:

$$(J_x + \lambda_{44})\ddot{\theta} + v_{44\theta_0}\dot{\theta} + \Delta h_{\theta_0}\theta = M_\varepsilon(t). \quad (25)$$

Для решения уравнения (25) разделим все его члены на первый коэффициент. Тогда получим

$$\ddot{\theta} + 2\nu_{\theta_0}\dot{\theta} + n_{\theta_0}^2\theta = n_{\theta_0}^2 m_\varepsilon(t). \quad (26)$$

Здесь

$$2\nu_{\theta_0} = \frac{v_{44\theta_0}}{(J_x + \lambda_{44})} - \quad (27)$$

коэффициент затухания в окрестности  $\theta = \theta_0$ ;

$$n_{\theta_0} = \sqrt{\frac{\Delta h_{\theta_0}}{(J_x + \lambda_{44})}} - \quad (28)$$

частота бортовой качки в окрестности  $\theta = 0$ ;

$$n_{\theta_0} = \sqrt{\frac{\Delta h_{\theta_0}}{(J_x + \lambda_{44})}} - \quad (29)$$

частота бортовой качки в окрестности  $\theta = \theta_0$ ; связь между этими частотами определяется соотношением

$$\frac{n_{\theta_0}}{n_\theta} = \sqrt{\frac{h_{\theta_0}}{h_\theta}}; \quad (30)$$

$$m_\varepsilon(t) = \frac{M_\varepsilon(t)}{\Delta h_\theta} - \quad (31)$$

безразмерный возмущающий момент от волн.

С учетом (30) уравнение (26) можно переписать в виде:

$$\ddot{\theta} + 2\nu_{\theta_0}\dot{\theta} + n_{\theta_0}^2 \frac{h_{\theta_0}}{h_\theta} \theta = n_{\theta_0}^2 m_\varepsilon(t). \quad (32)$$

Для описания нерегулярного волнения, используется спектральный подход, основанный на допущениях линейной гидродинамической теории. Возмущающий момент от воздействия волн должен быть гауссовым процессом, спектр которого  $S_{M_\varepsilon}(\omega)$  можно оценить по спектру углов волнового склона  $S_\alpha(\omega)$ :

$$S_{M_\varepsilon}(\omega) = [\Delta h_{\theta_0} \kappa_\theta(\omega)]^2 S_\alpha(\omega). \quad (33)$$

Здесь  $\kappa_\theta(\omega)$  - коэффициент, учитывающий конечность размеров судна. Он рассчитывается для каждого конкретного судна по соответствующим формулам, полученным в теории качки.

Спектр углов волнового склона  $S_\alpha(\omega)$  может быть определен по формуле

$$S_\alpha(\omega) = \frac{\omega^*}{g^2} S_r(\omega), \quad (34)$$

где  $S_r(\omega)$  - спектр морского волнения.

Спектр безразмерного возмущающего момента от волн можно записать в виде:

$$S_{m_\varepsilon}(\omega) = \frac{S_{M_\varepsilon}(\omega)}{(\Delta h_{\theta_0})^2} = [\kappa_\theta(\omega)]^2 \frac{\omega^*}{g^2} S_r(\omega). \quad (35)$$

В общем случае для определения спектра  $S_\theta(\omega)$  выходного процесса  $\theta$  может быть использовано линейное уравнение (32). Тогда

$$S_\theta(\omega) = \frac{n_{\theta_0}^2 S_{m_\varepsilon}(\omega)}{[n_{\theta_0}^2 - \omega^2]^2 + [2\nu_{\theta_0}\omega]^2}, \quad (36)$$

С помощью спектра  $S_\theta(\omega)$  может быть получена дисперсия:

$$D_\theta = \int_0^{+\infty} S_\theta(\omega) d\omega. \quad (37)$$

Подставив в (37) выражение (30) и (35), получим для дисперсии амплитуд качки от волнения:

$$D_\theta = \int_0^{+\infty} \frac{n_{\theta_0}^2 S_{m_\varepsilon}(\omega)}{[n_{\theta_0}^2 \frac{h_{\theta_0}}{h_\theta} - \omega^2]^2 + [2\nu_{\theta_0}\omega]^2} d\omega. \quad (38)$$

Дисперсия угловых скоростей получается по формуле

$$D_{\dot{\theta}} = \int_0^{+\infty} \frac{\omega^2 n_{\theta_0}^2 S_{m_\varepsilon}(\omega)}{[n_{\theta_0}^2 \frac{h_{\theta_0}}{h_\theta} - \omega^2]^2 + [2\nu_{\theta_0}\omega]^2} d\omega. \quad (39)$$

Формулы (36), (38) и (39) более приемлемы для судов, имеющих ярко выраженную S - образность диаграммы статической остойчивости. Для судов с обычной диаграммой с достаточной для практики точностью можно приравнять  $h_{\theta_0}$  и  $h_\theta$ ,  $2\nu_{\theta_0}$  и  $2\nu_\theta$ . Тогда выражения (36), (38) и (39) запишутся в виде:

$$S_\theta(\omega) = \frac{n_{\theta_0}^2 S_{m_\varepsilon}(\omega)}{[n_{\theta_0}^2 - \omega^2]^2 + [2\nu_{\theta_0}\omega]^2}; \quad (40)$$

$$D_\theta = \int_0^{+\infty} \frac{n_{\theta_0}^2 S_{m_\varepsilon}(\omega)}{[n_{\theta_0}^2 - \omega^2]^2 + [2\nu_{\theta_0}\omega]^2} d\omega; \quad (41)$$

$$D_{\dot{\theta}} = \int_0^{+\infty} \frac{\omega^2 n_{\theta_0}^2 S_{m_\varepsilon}(\omega)}{[n_{\theta_0}^2 - \omega^2]^2 + [2\nu_{\theta_0}\omega]^2} d\omega. \quad (42)$$

Амплитуду качки при воздействии нерегулярного волнения можно определять в зависимости от заданной обеспеченности  $a_\theta$  по формуле:

$$\theta_1 = a_\theta \sqrt{D_\theta} \quad (43)$$

Средняя амплитуда качки определяется при 46,5% обеспеченности

$$\theta_{ср.} = \sqrt{D_\theta} \quad (44)$$

Максимальная амплитуда качки определяется при 0,5% обеспеченности

$$\theta_{max} = 3,25 \sqrt{D_\theta} \quad (45)$$

Конкретные условия плавания будут учитываться через значения  $l_{w1}$  (т.е.  $\theta_0$ ),  $l_{w2}$  с заданной обеспеченностью и амплитуду качки  $\theta_1$  с заданной обеспеченностью. Выбор величин  $a_{l_{w2}}$  и  $a_\theta$  влияет на жесткость требований по обеспечению неопрокидывания и требует проведения дополнительных исследований и согласований.

### Литература

1. Луговский В.В. Теоретические основы нормирования остойчивости морских судов Ленинград. «Судостроение», 1971.
2. Благовещенский С.Н. Национальные требования к остойчивости неповрежденных судов. – В сб.: Теоретические и практические вопросы остойчивости и непотопляемости. М.–Л., «Транспорт», 1965 (Регистр СССР).

3. Севастьянов Н.Б. Основные вопросы нормирования остойчивости промысловых судов. – В сб.: Теоретические и практические вопросы остойчивости и непотопляемости. М.–Л., «Транспорт», 1965 (Регистр СССР).
4. Правила классификации и постройки морских судов. Морской регистр судоходства. Т.1, часть IV «Остойчивость», СПб, 1999.
5. Francescutto A., Serra A., Scarpa S. "A Critical Analysis of Weather Criterion for Intact Stability of Large Passenger Vessels", Proc. 20<sup>th</sup> Int. Conf. OMAE.01, Rio de Janeiro, 3-8 June 2001.
6. Davenport A. G. Spectrum of Horizontal Gustiness near the Ground in Strong Winds., Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 87, April 1961, pp. 194-211.
7. Vassalos D., Jasionowski A., Cichowicz J. Weather Criterion. Questions and Answers. Proc. STAB2003, Madrid, 2003, pp. 695-705

### References

1. Konceptija buksirnogo sudna Ulstein Aquamaster. Prospekt firmy Rolls-Royce.
2. Hannu Jukola, Gregory E.Castleman. Re-zhimy raboty jeskortnogo buksira s Z-obraznoj peredachej. Severo-zapadnaja Tihookeanskaja sekcija obshhestva SNAME, Vesennjaja sessija, seminar po dinamicheskoj podderzhke sudov i jeskortnym buksiram. Vankuver, maj 1994g.
3. C.D.Gale, K.Lindborg. Optimal'nyj buk-sir dlja jeskortirovanija tankerov. Mezhdunarodnaja konferencija obshhestva RANA po jeskortnym buksiram: opredelenie novej oblasti tehniki. London, oktjabr' 1993g.
4. Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov. Morskoy Registr sudohodstva. t.1, ch. IV "Ostojchivost". SPb: 1999.
5. Francescutto A., Serra A., Scarpa S. "A Critical Analysis of Weather Criterion for Intact Stability of Large Passenger Vessels", Proc. 20<sup>th</sup> Int. Conf. OMAE.01, Rio de Janeiro, 3-8 June 2001.
6. Davenport A. G. Spectrum of Horizontal Gustiness near the Ground in Strong Winds., Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 87, April 1961, pp. 194-211.
7. Vassalos D., Jasionowski A., Cichowicz J. Weather Criterion. Questions and Answers. Proc. STAB2003, Madrid, 2003, pp. 695-705

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

УДК 534.26

**МЯГКИЙ ВЫТЯНУТЫЙ СФЕРОИД В ПЛОСКОМ ВОЛНОВОДЕ С ТВЁРДЫМ УПРУГИМ ДНОМ, ОБЛУЧАЕМЫЙ ИМПУЛЬСНЫМ ЗВУКОВЫМ СИГНАЛОМ****Клещев Александр Александрович**

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
тел. (812) 757-10-55 e-mail: alexalex-2@yandex.ru

**Аннотация**

На основе метода мнимых источников и мнимых рассеивателей находится решение задачи дифракции импульсных звуковых сигналов на идеальном (мягком) вытянутом сфероиде, помещённом в плоский волновод с твёрдым упругим дном. В работе доказывается, что при такой постановке задачи исключается возможность использования метода нормальных волн поскольку импульсы представляют сгустки энергии и могут поэтому распространяться только с групповой (а не фазовой) скоростью, которая присуща как раз методу мнимых источников. Вычисления, выполненные в статье, показали, что мнимые источники с малыми номерами испытывают эффект полного внутреннего отражения, в результате этого их коэффициент отражения  $V$  от твёрдого упругого дна оказывается комплексным, при этом вещественная часть  $V$  близка к 1,0, что соответствует  $V$  абсолютно твёрдого дна. Найденные последовательности отражённых импульсов для твёрдого упругого и абсолютно твёрдого дна подтвердили это предположение. В дальнейшем предполагается переход от изотропного упругого дна к трансверсально – изотропному (алевролиту).

**Ключевые слова:** рассеиватель вытянутой сфероид, мнимый источник, дифракция, упругое твёрдое дно, граничные условия, групповая скорость, фазовая скорость.

**SOFT PROLATE SPHEROID IN PLANE WAVEGUIDE WITH HARD ELASTIC BOTTOM IRRADIATED BY PULSE SOUND SIGNAL****Kleshchev Alexander Alexandrovich**

The professor, Dr.Sci.Phys.-Math, the professor of DEPARTMENT OF PHYSICS STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG

Lotsmanskaya, 3. St. Petersburg 190008, Russian Federation  
tel. +7(812)757-10-55, e-mail: alexalex-2@yandex.ru

**Abstract**

Based on the method of imaginary sources and imaginary scatterers is the solution to the diffraction problem of sound pulse signals at ideal (soft) prolate spheroid, put in the plane waveguide with the hard elastic bottom. In the work is proved that with such a formulation of problems eliminated possibility of using the method of normal waves because pulses are bundles of energy and can therefore only be distributed to the group velocity which is inherent in just the method of imaginary sources. Calculations made in the article showed that imaginary sources with small numbers experiencing the effect of total internal reflection, as the result of the reflection coefficient  $V$  by the hard elastic bottom is complex and the real part of  $V$  is close to 1,0 which corresponds  $V$  absolutely hard bottom. Found sequences of reflected pulses for the elastic hard bottom and the absolutely hard bottom floor confirmed this approach. Later assumed the transition from the isotropic elastic bottom to the transversely – isotropic bottom (siltstones).

**Keywords:** scatterer, prolate spheroid, "imaginary source, diffraction, elastic hard bottom, boundary conditions, group velocity, phase velocity.

**Введение**

Хорошо известно [1], что импульсный звуковой сигнал, как сгусток энергии, распространяется с групповой скоростью. Это обстоятельство вынуждает нас использовать метод мнимых источников при изучении временных характеристик импульсных сигналов, рассеянных различными телами, помещёнными в плоский волновод [2 - 7]. При этом спектральные характеристики импульсов, имеющие дело с непрерывными гармоническими сигналами, могут исследоваться с помощью метода нормальных волн [8].

**1. Дифракция импульсного звукового сигнала на идеальном вытянутом сфероиде, находящемся в плоском волноводе с упругим твёрдым дном**

Обратимся к знакомой задаче дифракции звука на сфероидальных телах [2 - 4, 7], сохранив: на верхней границе условие Дирихле, размеры волновода и расположение точечного источника и рассеивателя относительно границ, заменив только идеально твёрдую нижнюю границу на упругое изотропное дно. Физические параметры подстилающей нижней среды будут соответствовать упругому изотропному дну, но по своим значениям они будут весьма близки к параметрам трансверсально – изотропной осадочной породы – крупного тёмно серого алевролита [9]. Скорость продольной волны в таком материале составит 4750 м/с, скорость поперечной волны - 2811 м/с. При использовании и в этом случае метода мнимых источников нужно ввести коэффициент отражения  $V$  для каждого из источников [10], при отображении источников относительно верхней границы источники, как и раньше [2 - 7], будут менять знак на противоположный, что соответствует изменению их фазы на  $\pi$ . Известно [10], что в методе мнимых источников граничные условия строго не выполняются ни на одной из границ волновода даже в случае идеальных граничных условий Дирихле и Неймана. Для лучшего выполнения этих условий в дифракционных задачах [2 - 7, 13] были введены мнимые рассеиватели путём зеркального отображения относительно границ. Точно также введём мнимые рассеиватели и в нашей задаче и сравним последовательность отражённых импульсов [2, 3, 13] в случае идеальных границ и при наличии в волноводе твёрдого дна. В [10] показано, что метод мнимых источников применим и в том случае, когда коэффициент отражения  $V$  будет являться функцией угла падения волны от источника относительно нормали к границе. В нашем случае этот угол будет определяться взаимным положением источника (действительного или мнимого) и рассеивателя (действительного или мнимого), на который падает волна от данного источника.

Так как приёмник совмещён с действительным источником  $Q$ , то последовательность отражённых импульсов будет определяться количеством и амплитудами отражённых сигналов (от различных рассеивателей), имеющих одинаковое время распространения от источников до рассеивателя и от рассеивателя до точки  $Q$ . Параметры волновода, положение действительного источника  $Q$  (совмещённого с приёмником) и действительного рассеивателя сохраним неизменными по сравнению с [2, 3, 13]:  $L = 1000$  м.,  $H = 400$  м., действительный источник  $Q$  и действительный рассеиватель находятся на глубине 200 м., рассеиватель в виде идеально мягкого вытянутого сфероида имеет соотношение полуосей  $a/b = 10$  ( $a = 0,279$  м.), а его ось вращения направлена перпендикулярно плоскости рисунка (см. рис. 1). Формула для коэффициента отражения  $V_{0N}$ , где  $N$  – номер источника, дана в [10].

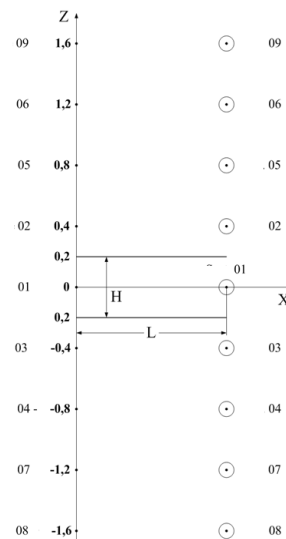


Рис. 1. Вытянутый сфероид в плоском волноводе с твёрдым упругим дном.

Для вычисления первых пяти отражённых импульсов нам нужны следующие коэффициенты отражения:  $V_{03}$  в направлении на первый (действительный) рассеиватель 01 рас.,  $V_{05}$  в направлении на второй (мнимый) рассеиватель 02 рас.,  $V_{06}$  в направлении на этот же второй рассеиватель. В результате несложных расчётов с помощью [10] получаем:  $V_{03} = 0,9989 + i0,0633$ ;  $V_{05} = 0,9989 + i0,0633$ ;  $V_{06} = 0,6238 + i0,7897$ .

Все три коэффициента получились комплексными, что означает полное внутреннее отражение на границе жидкость – упругое твёрдое дно, вследствие этого модули всех трёх коэффициентов отражения равны 1,0, а вещественные части первых двух коэффициентов близки к +1,0, что характерно для границы жидкость – абсолютно твёрдое дно. Полученная в результате расчётов последовательность из первых пяти отражённых импульсов представлена на рис. 2. Сравним её с последовательностью импульсов на рис. 3 для идеальных границ: 1-ый и 4-ый импульсы рис. 2 полностью совпадают с 1-ым и 2-ым импульсами рис. 3, что же касается 2-го, 3-его и 5-го импульсов рис. 2, то в случае идеальных границ и симметричного расположения действительных источника и рассеивателя относительно границ волновода, они компенсируются другими отражёнными импульсами, т. е. 2-ой, 3-ий и 5-ый импульсы рис. 2 показывают различие в последовательности отражённых импульсов при замене абсолютно твёрдого дна на упругое твёрдое.

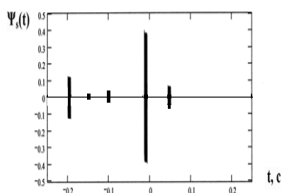


Рис. 2. Нормированная последовательность первых пяти отражённых импульсов в волноводе с твёрдым упругим дном

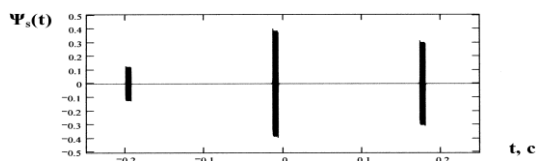


Рис. 3. Нормированная последовательность первых трёх отражённых импульсов в волноводе с идеальными границами.

### Заключение

В результате проведённых исследований можно сделать три вывода:

- 1) при изучении задач распространения и дифракции импульсных сигналов в плос-

ком волноводе нужно использовать метод мнимых источников, поскольку импульсы, как сгустки энергии, распространяются по любому направлению (в том числе и вдоль оси волновода) с групповой скоростью, не превышающей скорость звука, а именно на групповую скорость опирается метод мнимых источников;

- 2) замена твёрдого упругого дна на абсолютно твёрдое дно вполне допустима для тех источников (действительного и мнимых), волны от которых при падении на упругое твёрдое дно испытывают полное внутреннее отражение;
- 3) принятая нами модель мнимых источников и мнимых рассеивателей вполне допустима (из – за полного внутреннего отражения), по крайней мере, для первых пяти отражённых импульсов в волноводе с твёрдым упругим дном.



### Литература

1. Кольский Г. Волны напряжений в твёрдых телах. М.: ИЛ, 1956. 272 с.
2. Клещёв А. А., Кузнецова Е. И. Рассеяние импульсных звуковых сигналов сферoidalным телом, находящимся в плоском волноводе. / Сб. тр. XXIV сессии РАО. М.: ГЕОС. 2011. С. 198 – 201.
3. Kleshchev A. A., Kuznetsova E. I. Diifraction of Impulse Signals on Spheroidal Body, Put in Plane Waveguide/ / International Journal of Theoretical and Mathematical Physics. 2012. V. 2. № 6. P. 211 – 214.
4. Kleshchev A. A. Diffraction of Pulse Sound Signals on Elastic Spheroidal Shell, Put in Plane Waveguide. / Advanced Studies in Theoretical Physics. 2013. V. 7. № 13 – 16/ P. 697 – 705.
5. Kleshchev A. A, Diffraction of Sound Signals at Elastic Shell of Non-analytical Form Put in Plane Waveguide. / Advances in Signal Processing. 2014. V. 2. № 2. P. 46 – 49.
6. Kleshchev A. A. Pulse Sound Signals Diffraction on Elastic Bodies of Analytical and Nonanalytical Forms, Put in Plane Waveguide. / Zeitschrift fur Naturforschung A. 2015. V. 70. № 6. P. 419 – 427.
7. Клещёв А. А. Дифракция импульсных звуковых сигналов на упругих телах сферoidalной формы, находящихся в плоском волноводе. / Морские интеллектуальные технологии. 2015. Т. 2. № 28. С. 77 – 81.
8. Клещёв А. А., Ключкин И. И. Спектральные характеристики рассеяния звука телом, помещённым в звуковой канал. / Акуст. журн. 1974. Т. 20. № 3. С. 470 – 473.
9. Лехницкий С. Г. Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977. 416 с.
10. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 502 с.
11. Клещёв А. А. Гидроакустические рассеиватели. 2 – ое изд. С.-Пб.: Прима, 2012. 268 с.

### References

- 1 Kolskiy G. Waves of Stresses in Hard Bodies. M.: I L, 1956. 272 p.
- 2 Kleshchev A. A., Kuznetsova E. I. Scattering of pulse sound signals by the spheroidal body, put in plane waveguide. / Coll. Proc. Russ. Acoust. Soc. XXIV session. M.: GEOS. 2011. V. 1. P. 743 – 745.
3. Kleshchev A. A., Kuznetsova E. I. Diifraction of Impulse Signals on Spheroidal Body, Put in Plane Waveguide/ / International Journal of Theoretical and Mathematical Physics. 2012. V. 2. № 6. P. 211 – 214.
4. Kleshchev A. A. Diffraction of Pulse Sound Signals on Elastic Spheroidal Shell, Put in Plane Waveguide. / Advanced Studies in Theoretical Physics. 2013. V. 7. № 13 – 16/ P. 697 – 705.
5. Kleshchev A. A, Diffraction of Sound Signals at Elastic Shell of Non-analytical Form Put in Plane Waveguide. / Advances in Signal Processing. 2014. V. 2. № 2. P. 46 – 49.
6. Kleshchev A. A. Pulse Sound Signals Diffraction on Elastic Bodies of Analytical and Nonanalytical Forms, Put in Plane Waveguide. / Zeitschrift fur Naturforschung A. 2015. V. 70. № 6. P. 419 – 427.
- 7 Kleshchev A. A. Diffraction of Pulse Sound Signals on Elastic Bodies of Spheroidal Form Put in Plane Waveguide/ / MIT. 2015. V. 2. № 28. P. 77 – 81.
- 8 Kleshchev A. A., Klyukin I. I. The spectral characteristics of the scattering of the sound by body, placed in the sound channel. / Sov. Phys. Acoust. 1974. V. 20. № 3. P. 470 – 473.
- 9 Lekhnitskiei S. G. Theory of Elasticity of Anisotropic Elastic Body. M.: Science, 1977. 416 p.
10. Brechovakikh L. M. Waves in Laminated Mediums. M.: Publ. Acad. Scien. SSSR, 1957. 502 p.
- 11 Kleshchev A. A. Hydroacoustic Scatterers. S.-Pb.: Prima, 2012. 268 p.

УДК 656.6.08: 007.52

## МУЛЬТИАГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЙ В БОРТОВЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

**Нечаев Юрий Иванович**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры вычислительной техники и информационных технологий  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

**Лютин Анатолий Владимирович**

аспирант кафедры вычислительной техники и информационных технологий  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: anatoly.lyutin@gmail.com

### Аннотация

Обсуждаются вопросы приложения методов мультиагентного моделирования в бортовых интеллектуальных системах поддержки принятия решений при контроле остойчивости судов на волнении. В работе формулируются концептуальные основы и принципы построения системы мультиагентного моделирования. Предложен сценарный подход для задачи мультиагентного моделирования экстремальных ситуаций. Ядро мультиагентной системы построено на основе теории активных иерархических систем. Рассмотрены особенности функционирования динамической базы знаний и механизма логического вывода при интерпретации экстремальных ситуаций в режиме экстренных вычислений. Разработанная модель мультиагентного моделирования реализована на основе концепции нейродинамической системы, интегрирующей методы нейронно-четкого и нейроэволюционного моделирования. Представлена модель функционирования мультиагентной системы поддержки принятия решений на основе динамической теории катастроф, методов классической математики и теории корабля.

**Ключевые слова** Мультиагентное моделирование, экстремальные ситуации, интеллектуальная система, поддержка принятия решений.

## MULTI-AGENT SIMULATION OF EXTREME SITUATION IN THE ONBOARD INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEMS

**Nechaev Yuri Ivanovich**

the professor, Dr.Sci.Tech.,  
the professor of COMPUTER SCIENCE DEPARTMENT  
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation

**Lyutin Anatoly Vladimirovich**

graduate student of COMPUTER SCIENCE DEPARTMENT  
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation, 3  
e-mail: anatoly.lyutin@gmail.com

## Abstract

The paper discusses the application multi-agent simulation methods in onboard intelligent decision support system under the control of the stability of ships in waves. The paper formulates the conceptual foundations and principles of multi-agent simulation system. A scenario approach to the problem multi-agent simulation of extreme situations is proposed. The core of the multi-agent system is designed on the basis of active hierarchical systems theory. The features of the functioning of a dynamic knowledge base and the inference engine in interpreting extreme situations in the urgent computation is discussed. Multi-agent simulation model is implemented based on the concept of neurodynamic system, integration of the neuro-evolutionary and neuro-fuzzy modeling. The model of the functioning of the multi-agent decision support system based on the dynamic catastrophe theory, methods of classical mathematics and the ship theory.

**Key words** Multi-agent simulation, urgent computation, intelligent systems, decision support systems.

## Введение

При выборе системы мультиагентного моделирования (multi-agent simulation) поведения судна на волнении вводится понятие информационной среды, позволяющее использовать информацию о целях, законах функционирования системы, математическом аппарате для исследования методов и алгоритмов поддержки принятия решений (ППР) по управлению поведением судна в исследуемых экстремальных ситуациях [1] – [15]. Объектом рассматриваемой прикладной теории мультиагентного моделирования динамических характеристик является процесс взаимодействия судна с внешней средой при различном уровне внешних возмущений. Интерпретация поведения судна в экстремальных ситуациях основана на концептуальных решениях динамической теории катастроф [5].

Характерной особенностью операций контроля и прогноза при мультиагентном моделировании в ИС нового поколения, является многообразие условий работы (многорежимность), а также реактивность, т.е. способность выполнять сложные вычислительные и логические операции в режиме реального времени. Высокая производительность параллельной обработки информации в мультиагентных системах (МАС) обусловлена решением проблемы компактности описания на основе концепции минимальной длины описания А.Н.Колмогорова [2] и теории сложности [5] для обеспечения качества решения функциональных задач и реализации вычислительных процедур.

*Актуальность исследования* связана с формулировкой концептуальных основ и принципов построения системы мультиагентного моделирования экстремальных ситуаций в ИС новых поколений.

*Новизна исследования* характеризуется следующими особенностями:

- осуществлен синтез виртуальной среды мультиагентного моделирования путем интеграции взаимодействующих интеллектуальных агентов (ИА), обеспечивающих повышение функциональности системы;

- сформулирован алгоритм интерпретации МАС как активной иерархической системы, функционирующей в среде распределенного интеллекта;

- разработаны принципы мультиагентного моделирования и информационной среды контроля экстремальных ситуаций в рамках много-режимной динамической системы.

Таким образом, настоящее исследование представляет собой развитие теоретических принципов мультиагентного моделирования в бортовых ИС на основе динамической теории катастроф, построенной на основе современных интеллектуальных технологий и высокопроизводительных вычислительных средств обработки информации в режиме экстренных вычислений.

1. Особенности мультиагентного моделирования в задачах контроля поведения сложных систем

Мультиагентное моделирование реализуется на основе базовой МАС контроля динамической среды взаимодействия судна с внешней средой. На основе модели МАС можно инициализировать процессы принятия решений с использованием интеллектуальных технологий. При этом формализация поведения объектов в виртуальной среде МАС осуществляется путем замены реальной ситуации на искусственную среду, характеристики которой определяют динамику развития ситуации.

При проектировании систем мультиагентного моделирования, обеспечивающих коллективное поведение интеллектуальных агентов (ИА), можно выделить два основных подхода (рис.1):

1. Поведение МАС, формируемое на основе поддержания взаимодействия интеллектуального лидера и стратегий поведения ограниченного числа ИА в общей среде [1], [7], [8].

2. Поведение МАС на основе стратегий поведения многочисленных ИА, образующих динамическую среду взаимодействия с учетом состояния агентов, использующих методы теории игр, теории графов и др. [12], [13], [15].

Эффективность первого подхода зависит от типа задачи и возможности отображения глобального поведения МАС в зависимости от поведения отдельных ИА и специфики задачи. Эффективность

второго подхода заключается в формировании метода обучения и его вычислительной сложности. В задачах мультиагентного моделирования добавление новых ИА в первом случае ведет к перестройке функционального пространства взаимодействия, а во втором – к экспоненциальному расширению пространства состояний и сложности системы, уменьшение которой достигается путем разработки специальных алгоритмов взаимодействия в МАС [7],[8].

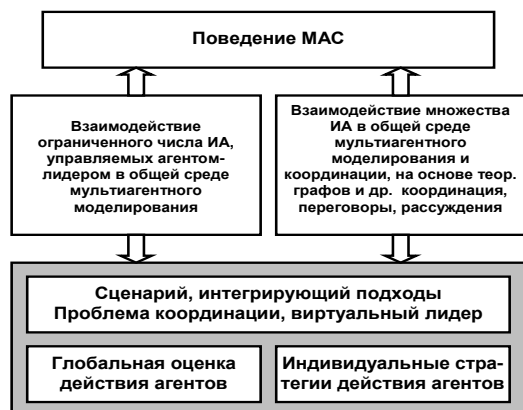


Рис.1. Подходы к моделированию поведения МАС

Структура МАС представляется кортежем:

$$\langle \Phi(FC), X, Y \rangle, \quad (1)$$

где  $\Phi(FC)$  – функция нечеткого соответствия,  $X$  – область входных воздействий,  $Y$  – область выхода системы, причем декартово произведение

$$X \times Y \subseteq M(FC) \quad (2)$$

определяет множество, задающее область определения нечеткого соответствия.

Базовая МАС экстренных вычислений [14] образует иерархическую структуру системы коллективного интеллекта, инвариантную внешним воздействиям. Интерпретация эволюционирующей МАС позволяет представить структуру активной системы в виде кортежа:

$$\langle C(IA), S(FC), J(A), K(C), S(FC), E(FS) \rangle, \quad (3)$$

где  $C(IA) = (1, \dots, n)$  – множество взаимодействующих интеллектуальных агентов (ИА);  $S(FC)$  – семейство нечетких соответствий;  $J(A)$  – множество действий агентов;  $K(C)$  – множество коммуникационных связей;  $S(FC)$  – множество нечетких состояний;  $E(FS)$  – множество нечетких эволюционных стратегий.

Группа взаимодействующих ИА в единой среде МАС описывается с помощью пространства состояний и действий, а также стратегией поведения:

- $A = (A_1, \dots, A_n)$  – пространство действий, где  $A_i = A_i(s_i)$ ,  $A_i \subseteq A_i$ . Текущее действие

агента  $a_i \in A_i$  является частью объединенного действия  $a = [a_1, \dots, a_n]$  МАС;

- пространство состояний МАС – множества переменных состояния  $S = \{S_1, \dots, S_n\}$ . Объединенное состояние  $S$  определяет состояние агента  $A_i(s_i)_j$  с учетом его переменной состояния  $S_j$ ;
- глобальная стратегия поведения  $a_i = \pi(s_i)$  определяет объединенное действие по текущему глобальному состоянию МАС.

Целью обучения группы ИА является получение оптимальной глобальной стратегии  $\pi^*$ , минимизирующей глобальную функцию ценности системы  $Q^*(s,a)$ . В задачах кооперации агенты учитывают только релевантные состояния и действия других агентов, что позволяет значительно уменьшить пространство поиска состояний. Знания о релевантных влияниях агентов друг на друга, максимизирующие функцию  $Q^*(s,a)$ , называются стратегией координации.

Метод моделирования МАС основан на концепции распределенного интеллекта [1]. Ассоциации автономных взаимодействующих ИА отображает парадигму самоорганизующейся системы [6]. Множество распределенных ИА взаимодействуют параллельно в зависимости от особенностей искусственной среды и структурных ограничений. Локальная сеть взаимосвязей ИА постоянно изменяется и рекомбинируется. Таким образом, исследование функционального состояния системы мультиагентного моделирования направлено на формализацию глобального поведения, которое складывается из локальных взаимодействий распределенных ИА.

Концептуальный базис среды взаимодействия в МАС – это интегрированная модель ассоциации ИА, которые обладают функцией погружения в виде набора множества состояний среды и множества действий ИА. Функция погружения содержит алгебру поведения ИА в виде функциональных моделей. Концепция МАС в различных приложениях допускает возможность использования многоуровневых сред обеспечивающих эквивалентные преобразования алгоритмических и программных реализацией экстренных вычислений [11]. При этом неточности в теоретических моделях преобразования информации о динамике взаимодействия судна с внешней средой могут привести к размыванию границ исследуемого феномена, а активация реакции МАС на внешние воздействия – к нарушению системного гомеостаза [6].

## 2. Постановка задачи исследования

Задача мультиагентного моделирования динамики судна в экстремальных ситуациях сводится к построению сценариев (ситуационной модели) с динамически изменяющимся классом стратегий и управлением сценарием. Для решения задачи формируется сценарий функционирования мультиагентной системы (МАС)  $S_C$ , процедуры выполнения которого состоят в представлении  $S_C$  в ви-

де объединения стратегий (альтернатив)  $S_c^{ij}$  и моментов управления  $t_j$ , ( $j=1, \dots, N$ )

$$S_c = \bigcup_{t_j} S_c^{t_j} \quad (4)$$

Переходы между стратегиями  $P_S$  описываются с помощью отображения множества эффективных стратегий в виде двух множеств, первое из которых соответствует множеству дуг, второе – множеству полезностей этих стратегий в множестве дуг.

Решающее правило выбора альтернатив в задаче многокритериальной оптимизации представляется пересечением нечетких целей  $G_i$  и ограничений  $C_j$  или выпуклой комбинацией с учетом их относительной важности:

$$D = G_1 \cap \dots \cap G_i \cap C_1 \cap \dots \cap C_j \dots;$$

$$D = \sum_i \alpha_i G_i + \sum_j \alpha_j G_j, \quad \sum_i \alpha_i + \sum_j \alpha_j = 1, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент важности.

Общая постановка задачи мультиагентного моделирования по данным динамических измерений может быть сведена к поиску экстремума критериальной функции на множестве различных моделей  $\Phi$ , характеризующих поведение судна в экстремальных ситуациях:

$$f^* = \arg \min_{f \in \Phi} CR(f) \quad (6)$$

Представление (6) содержит формулировку задачи мультиагентного моделирования в соответствии с общей постановкой задачи исследования поведения сложных динамических объектов (ДО) на основе мультиагентного моделирования. Вид и объем исходной информации содержит класс базисных функций (операторов), формируемых множеством  $\Phi$ , а также способ генерации моделей интерпретации пространства поведения  $f$  и метода оценивания параметров состояния  $F$  в соответствии с особенностями функционирования ИС на основе динамической теории катастроф [5]. Критерий сравнения моделей на основе принципа конкуренции [5] – [6] реализуется с учетом методов идентификации, аппроксимации и прогноза с помощью функции  $CR(f)$ .

Исходной информацией для построения системы мультиагентного моделирования является модель преобразования информации представленная на рис. 1. В отличие от исследований [12], [13], [15], разработанная модель содержит массивы данных в виде вектора условий взаимодействия судна в экстремальных ситуациях,  $X = \{X_1, \dots, X_n\}$ , вектор интерпретации решений, включающий множество решений  $Y = \{Y_1, \dots, Y_m\}$ , определяемых структурами  $MAC$  в экстремальных ситуациях, и матрицу соответствия, задающую модель связи между условиями взаимодействия  $X$  и решениями  $Y$ . Информационная среда мультиагентного моделирования включает функциональные модули

анализа и интерпретации решений при оценке потери устойчивости на волнении, ориентированные на решение задач обработки информации в текущих ситуациях. На основе такой интерпретации разработана иерархическая модель системы мультиагентного моделирования, объединяющая функциональные модули прикладных программ среды и задач моделирования в интегрированную систему на различных уровнях абстракции.

3. Мультиагентное моделирование на основе динамической иерархической сети  
Программный комплекс, реализующий систему мультиагентного моделирования, строится на основе теории активных иерархических систем [9]. Такие системы выполняют задачу уменьшения числа степеней свободы в пространстве состояний, т.е. динамическая система выходит из множества начальных условий начальной размерности и попадает в некоторое компактное подмножество пространства состояний (аттрактор), имеющее гораздо меньшую размерность. В нашем случае имеем две системы, находящиеся в динамической среде. Каждая система определена как ансамбль взаимодействующих компонент, число которых ограничено. Среда функционирует следующим образом: один из ее параметров (существенный фактор), оказывающий воздействие на системы  $A$  и  $B$ , случайно изменяется во времени. Мы имеем в виду установление коммуникационной связи между двумя системами  $A$  и  $B$ . По существу речь идет о мультиагентном моделировании одной физической части другой с целью предсказания и управления первой системой.

Для того, чтобы система  $A$  могла воспроизводить функционирование системы  $B$  надо иметь алгоритм минимального динамического сжатия описанной системы  $B$  во времени на интервале реализации  $[t_0, t_k]$  как в прошлом так и в будущем. Для того, чтобы система  $A$  могла воспроизводить (моделировать) систему  $B$  (или наоборот) система должна быть иерархической, т.е. обладать уровнем  $N$  и аппаратурой реализации и уровнем программного обеспечения  $S$  – функциональной структурой, наделенной способностью к самоорганизации (когнитивный уровень). Исходная информация в форме дискретного временного ряда поступает с  $S$  –уровня  $IB(S_2)$  на  $N$  уровень системы  $A(N1)$ , где между принятым временным рядом и внутренней динамикой системы  $A$  на уровне  $N$  происходит ряд кросс-корреляций [9]. В результате таких сверток возникает некоторое коллективное свойство  $MAC$ , обладающее меньшим числом степеней свободы, чем  $S_2$  или  $N$ . Это коллективное свойство передается на уровень  $S_1$  и образует одно сложное состояние системы мультиагентного моделирования.

При этом организация динамической иерархической сети переходит на новый уровень функционирования с учетом всех алгоритмов выполнения исследуемых процессов. Таким образом, между

системами А и В осуществляется эволюционная стратегия имеющая вид:

$$\begin{aligned} S_1 &= H_1 \otimes S_2; \\ S_2 &= H_2 \otimes S_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Процесс для первой пары сводится к непрерывной итерации  $S_1$  и  $S_2$  в сложных условиях функционирования на основе данных динамических измерений, поступающей с датчиков измерительной и системы и априорной информации, содержащейся в базе данных ИС ППР.

При выборе системы мультиагентного моделирования в рамках иерархической системы вводится понятие информационной среды, позволяющее использовать информацией о целях, законах функционирования системы МАС, математическом аппарате для исследования методов и алгоритмов принятия решений по управлению поведением судна в исследуемых экстремальных ситуациях. Таким образом, объектом рассматриваемой прикладной теории мультиагентного моделирования динамических характеристик является процесс взаимодействия, реализуемый на основе концепции динамической теории катастроф.

В итоге, основная цель исследования поведения судна в экстремальных ситуациях – выяснение физических аспектов проблемы взаимодействия в сложной динамической среде мультиагентного моделирования и построение концептуальных решений в виде динамической модели иерархической системы, характеризующей результат интеграции достижений в области реализации перспективных направлений развития интеллектуальных технологий XXI века [6].

#### 4. Теоретический базис мультиагентного моделирования поведения судна на волнении

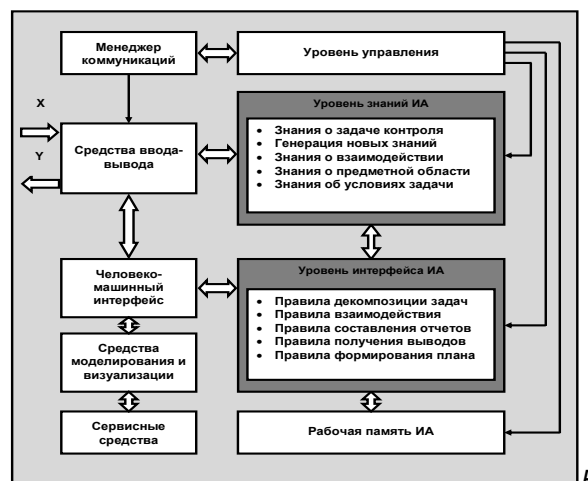
Исходная информация для функционирования МАС представляется в виде дерева типовых процедур, элементы которого определяют поток информации в системе мультиагентного моделирования с помощью характеристик типовых процедур А, В, С, D, E, F, G (табл.1). Последовательность выполнения операций А → G отображает реальный процесс обработки информации при функционировании вычислительного комплекса в режиме реального времени – от момента получения данных от датчиков измерительной системы – до реализации процесса мультиагентного моделирования, визуализации результатов при выработке управляющих воздействий.

Таблица. 1

Таблица процедур, выполняемых ИА системы мультиагентного моделирования

Структура	Характеристика
(A-1) – (A-4)	Функции измерительной системы
(B-1) – (B-3)	Обработка данных измерений
(C-1) – (C-5)	Оценка текущей ситуации
(D-1)–(D-11)	Экстремальные ситуации
(E-1) – (E-7)	Процедуры принятия решений
(F-1) – (F-5)	Прогноз экстремальных ситуаций
(G-1) – (G-3)	Моделирование ситуаций
(H-1) – (H-3)	Визуализация ситуаций

Приведенные процедуры позволяют распределить функции пространства поведения  $f$  и пространства управления  $F$  динамической теории катастроф и реализовать концепцию МАС как коллективное поведение ИА при контроле и прогнозировании рассматриваемых экстремальных ситуаций. При этом ИА группы А реализуют функции измерительной системы и обработки данных измерений, ИА группы В – механизм логического вывода, ИА группы С – функции адаптивного поведения и ИА группы D – интеллектуальную поддержку оператора бортовой ИС. Архитектурное решение представления ИА является развитием концепции классической модели МАС [1], [7], [8].



ис. 2. Архитектура ИА бортового комплекса

Реализацию этой архитектуры можно рассматривать как звено нижнего уровня многоуровневой МАС. Верхний уровень (мета-уровень) обеспечивает координацию функционирования всей МАС на основе глобальной стратегии решения общей задачи контроля динамики судна как сложного объекта.

Как следует из рис. 2 особенностью ИА как элемента сложной системы, является многоуровневое представление знаний:

- уровень знаний о предметной области динамики судна на волнении;
- уровень знаний об условиях решения задачи контроля и прогнозирования;
- уровень генерации новых знаний при функционировании адаптивной компоненты.

Совокупность ИА образует МАС с распределением общего решения задачи контроля между агентами. При контроле ситуаций и прогнозировании их развития используются древовидные структуры в виде дерева целей и дерева критериев [7], [8]. Каждый ИА ориентирован на решение конкретной подзадачи, определяемой деревом целей. Результат достижения цели для выделенных уровней каждого ИА оценивается соответствующим комплексным критерием:

$$(KR)_c = \{K_{ij}\}, \quad (8)$$

где  $i=1, \dots, I_c$  и  $j = 1, \dots, J_c$  – качественные и количественные параметры дерева критериев, соответствующих дереву целей решения комплексной задачи анализа обработки информации в МАС.

Функционирование мультиагентного моделирования в бортовой ИС осуществляется на основе динамической базы знаний, обеспечивающей анализ и прогноз развития нештатных и экстремальных ситуаций, возникающих в процессе эксплуатации судна. Методы и модели, положенные в основу обработки информации, позволяют исследовать динамические процессы в условиях неопределенности и неполноты исходной информации. Наибольший интерес представляют состав и структура базы данных и базы знаний, особенно их содержательное наполнение в процессе функционирования ИС в различных условиях эксплуатации. Эти среды предусмотрены для хранения алгоритмов решения задач, дерева целей и дерева критериев.

Математическую модель взаимодействия элементов МАС определяют основные факторы:

- внешнее возмущение, представляемое в виде граф-интереретации при моделировании динамики внешней среды;
- реальная модель отображения сложного взаимодействия в текущей ситуации, включающая функцию интерпретации эволюции системы. Разработанные структуры фрактальной геометрии, отображающие результат мультиагентного моделирования, позволяют представить эволюцию системы в соответствии с особенностями функционирования программного комплекса мультиагентного моделирования.

При реализации МАС на основе динамической теории катастроф используется математическая модель взаимодействия в виде модифицированного дифференциального уравнения Матье [5].

Это уравнение — наиболее часто используемое описание динамики систем. В отличие от стандартной формы уравнения Матье (линейная модель), модифицированное уравнение содержит компоненты, установленные на основе нелинейной пространственной функции, принятой в международной практике при тестировании программных систем динамики судна на волнении [11]:

$$\theta'' + k\theta' + h(\theta) + \Delta h(\theta)\cos(\omega t) = 0, \quad (9)$$

где  $k$  – коэффициент демпфирования;  $h(\theta)$  и  $\Delta h(\theta)$  – нелинейные составляющие, определяемые выражениями, полученными в результате обработки нелинейной пространственной функции (рис.3), описывающей восстанавливающий момент на волнении  $M(\theta, \varphi, t)$  при различных курсовых углах  $\varphi$  [5].

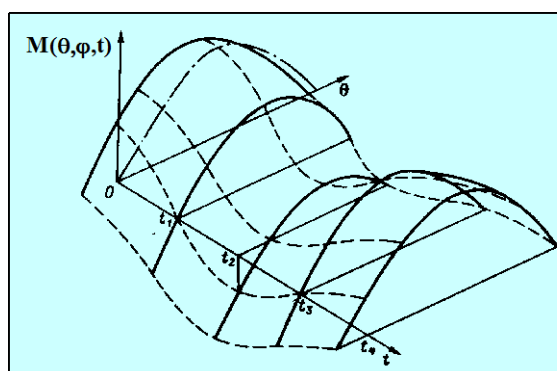


Рис. 3. Поверхность, характеризующая непрерывное изменение восстанавливающего момента на волнении: сложные кривые – мгновенные диаграммы остойчивости; пунктир – временные кривые (сечения поверхности при  $\theta = const$ ); штрих пунктир – диаграмма остойчивости на тихой воде

Другой математической моделью является уравнение Дуффинга, модифицированное за счет введения дополнительного нелинейного члена:

$$\psi'' + k_1\psi' + \omega^2\varphi + \mu_1\varphi^3 - \mu_2\psi^5 = f(t), \quad (10)$$

где  $k_1$  – коэффициент демпфирования;  $f(t)$  – внешнее возмущение.

На основе соотношений (9), (10) разработаны алгоритм и программный комплекс функционирования ИС контроля поведения судна в экстремальных ситуациях, указанных на рис.4.

При оценке адекватности модели МАС в задачах интерпретации критических ситуаций при движении судна на волнении с учетом НЕ-факторов [5] и классификацией сред моделирования [6] рассматриваются следующие условия взаимодействия (рис.4).

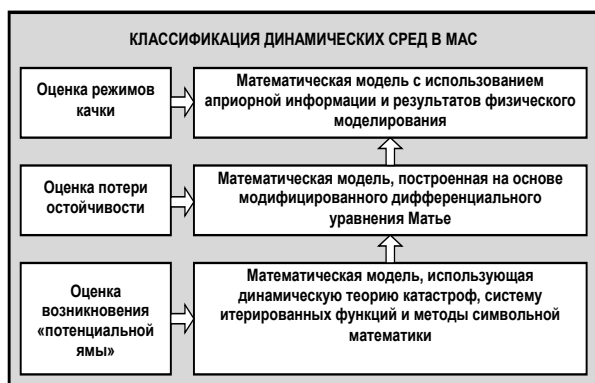


Рис. 4. Классификация динамических сред при оценке адекватности МАС

Задача исследования поведения судна на волнении в условиях неопределенности связана с рассмотрением отображения поведения судна в экстремальной ситуации:

$$F : (R^n) \times (R^r) \rightarrow R, \quad (11)$$

где  $(R^n)$  и  $(R^r)$  — пространство поведения и пространство управления, с помощью которых необ-  
Заклучение

Разработанная система мультиагентного моделирования содержит уникальные механизмы обработки информации в сложных динамических средах, характерных для функционирования бортовой ИС. Предлагаемая схема организации МАС позволяют получить важные преимущества при функционировании в условиях неопределенности и неполноты исходной информации:

- параллелизм обработки информации разными ИА;
- уменьшение объема информации за счет передачи высокоуровневых решений;
- гибкость и повышенная надежности системы.

Отмеченные новые качественные признаки программного комплекса бортовой ИС, построенной на основе концепции МАС, позволяют обеспечить совместное решение сложных задач кон-

ходимо выполнить анализ функционирования ИС на основе достижений классической математики, теории корабля и интеллектуальных технологий, интегрированных в динамической модели катастроф [5].

Стратегия оценки адекватности моделей вычислительного комплекса определяет формализацию процедуры на основе учета существенных факторов. В рамках такого представления сформулирован общий алгоритм вычислительного комплекса бортовой ИС, обеспечивающий преобразование информации при оценке поведения судна на волнении в рассматриваемых экстремальных ситуациях:

$$\{W(t) \times V(t)\} \rightarrow \Omega(\theta, \psi, \dots, \zeta, [t_1, t_k]), \quad (12)$$

где  $\{W(t) \times V(t)\}$  – возмущения внешней среды;  $\Omega(\bullet)$  — область поведения судна под воздействием внешних возмущений;  $(\theta, \psi, \dots, \zeta)$  — параметры, определяющие динамику судна в текущей ситуации;  $[t_1, t_k]$  – интервал реализации.

троля и прогнозирования динамики судна, а также и возможность передачи решающих функций между агентами в случае возникающих затруднений. Это повышает оперативность и обоснованность принимаемых решений при обеспечении высокой достоверности и актуальности информации, предоставляемой оператору для принятия решений.

Переход системы, определяемой пространством поведения при интерпретации экстремальных ситуаций с одного состояния в другое, характеризуется более высокой иерархической организацией. Последовательность фазовых переходов в системе мультиагентного моделирования определяется бифуркационным множеством динамической модели катастроф [5] и связана с изменениями природы вектора входящих переменных (вектора состояния), установленных оценкой пространства поведения.

### Литература

1. Городецкий В.И. Многоагентные системы: современное состояние исследований и перспективы применения // Новости искусственного интеллекта. 1996. №1, с.44-59.
2. Колмогоров А.Н. Теория информации и теория алгоритмов. М.: Наука, 1987.
3. Моделирование обучения и поведения. М.: Наука, 1975.
4. Моисеев Н.Н. Избранные труды, М. Тайрекс Ко, 2003.
5. Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. СПб.: Арт-Экспресс, 2011.
6. Нечаев Ю.И. Топология нелинейных нестационарных систем. СПб.: Арт-Экспресс, 2015.
7. Нечаев Ю.И., Лютин А.В. Мультиагентная система управления функционированием бортового вычислительного комплекса // Сборник докладов XI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM-2009. СПб.. 2009. т.2, с. 55 – 58.



8. Нечаев Ю.И., Лютин А.В. Интеллектуальная система, функционирующая ос основе мультиагентных технологий // Искусственный интеллект. №3. 2009, с.413 – 422.
9. Николис Дж. Динамика иерархических систем: эволюционное представление. М.: Мир, 1989.
10. Новиков Д.А., Петраков С.Н. Курс теории активных систем. М.: СИНЕГ, 1999.
11. Belenky V.L., Sevastianov N.B. Stability and safety of ships. Risk and capsizing. Second Edition. The Society of Naval Architects and Marine Engineering (SNAME). USA, 2007.
12. Helbing D., Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics / Phys. rev. E. 1995. Vol. 51, № 5. P. 4282.
13. Panait L., Luke S. Cooperative multi-agent learning: the state of the art // Autonomous agents and multi-agent systems. 2005. Vol.11. №3, p.p.387– 434.
14. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007.
15. Wooldridge M, Jennings N. Intelligent agents: Theory and practice // The knowledge Engineering Review, 1995. №10(2), p.p.115-152.

### References

1. Gorodetskiy V.I. Mnogoagentnye sistemy: sovremennoe sostoyanie issledovaniy i perspektivy primeneniya. Novosti iskusstvennogo intellekta, 1996 - № 1, pp.44-59 (In Russian).
2. Kolmogorov A.N. Teoriya informatsii i teoriya algoritmov. Moscow, Nauka, 1987.
3. Modelirovanie obucheniya i povedeniya. Moscow, Nauka, 1975.
4. Moiseev N.N. Izbrannyye trudy. Moscow, Tayreks Ko, 2003.
5. Nechaev Yu.I. Teoriya katastrof: sovremennyy podkhod pri prinyatii resheniy. Saint-Petersburg, Art-Ekspress, 2011.
6. Nechaev Yu.I. Topologiya nelineynykh nestatsionarnykh sistem. Saint-Petersburg, Art-Ekspress, 2015.
7. Nechaev Yu.I., Lyutin A.V. Mul'tiagentnaya sistema upravleniya funktsionirovaniem bortovogo vychislitel'nogo kompleksa. Proceeding of the SCM-2009 XI International Conference, Saint-Petersburg, 2009. – V. 2 – P. 55-58. (In Russian).
8. Nechaev Yu.I., Lyutin A.V. Intellektual'naya sistema, funktsioniruyushchaya os osnove mul'tiagentnykh tekhnologi. Iskusstvennyy intellekt Journal. №3, 2009, pp.413 – 422.
9. Nikolis Dzh. Dinamika ierarkhicheskikh sistem: evolyutsionnoe predstavlenie. Moscow, Mir, 1989.
10. Novikov D.A., Petrakov S.N. Kurs teorii aktivnykh sistem. Moscow, SINEG, 1999.
11. Belenky V.L., Sevastianov N.B. Stability and safety of ships. Risk and capsizing. Second Edition. The Society of Naval Architects and Marine Engineering (SNAME). USA, 2007.
12. Helbing D., Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics / Phys. rev. E. 1995. Vol. 51, № 5. P. 4282.
13. Panait L., Luke S. Cooperative multi-agent learning: the state of the art Autonomous agents and multi-agent systems. 2005. Vol.11. №3, p.p.387– 434.
14. Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25-26, 2007.
15. Wooldridge M, Jennings N. Intelligent agents: Theory and practice The knowledge Engineering Review, 1995. №10(2), p.p.115-152.

УДК 537.84

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ РТУТИ В ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**Маламанов Степан Юрьевич**

Кандидат физико-математических наук, докторант  
Санкт-Петербургский государственный университет  
198504, Санкт-Петербург, Петергоф, Университетский просп., 35  
e-mail: stevmal@mail.ru

**Павловский Валерий Алексеевич**

Доктор физико-математических наук, профессор  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

### Аннотация

В последнее время очень часто численные методы исследования используются, как альтернатива дорогих и трудоемких экспериментальных. Современные вычислительные комплексы позволяют проводить анализ научно – технических задач в самых разных областях практической деятельности. В работе рассматривается применение гидродинамического модуля ANSYS.CFX к расчету турбулентного течения ртути. Прикладывается постоянное магнитное поле, перпендикулярное скорости движения. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными. Интерес к подобной задаче вызван в первую очередь проблемами атомной энергетики, где вопросам теплообмена и повышению энергетической эффективности теплообменных аппаратов уделяется громадное значение. Интенсификация конвективного теплообмена достигается как применением турбулизаторов, так и использованием в качестве теплоносителей жидких металлов Работа является продолжением работы [7], в которой рассматривается моделирование течения ртути в канале квадратного сечения.

Ключевые слова: численное моделирование, проводящая жидкость, электропроводность, скорость потока, турбулентность, магнитное поле, число Гартмана, число Рейнольдса.

## NUMERICAL MODELING OF TURBULENT FLOWS MERCURY IN UNIFORM MAGNETIC FIELD

**Malamanov Stepan Yur'evich**

Kandidat fiziko-matematicheskix nauk, doktorant  
Sankt-Peterburgskij gosudarstvenny'j universitet  
198504, Sankt-Peterburg, Petergof, Universitetskij prosp., 35  
e-mail: stevmal@mail.ru

**Pavlovsky Valery Alekseevich**

Doktor fiziko-matematicheskix nauk, professor  
Sankt-Peterburgskij gosudarstvenny'j morskoy texnicheskij universitet  
190008, Sankt-Peterburg, ul. Lozmanskaya, 3  
e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

### Abstract

Recently, numerical methods are used, are, as an alternative to expensive and time-consuming experimental. Modern computing systems allow for the analysis of scientific - technical problems in a variety of practice areas. The paper deals with the use of hydrodynamic module ANSYS.CFX to the calculation of the turbulent flow of mercury. This computer system can adequately reproduce the external and internal aerodynamics, stress-strain and thermal state, for multiphase media, burning and more. Calculation of MHD flows became possible only recently with the advent of a special module MHD. Applies a constant magnetic field perpendicular to the velocity. The calculation results are compared with experimental data. Interest in this problem due primarily to problems of nuclear power, where the issues of heat transfer and energy efficiency of heat exchangers is given great importance. Intensification of convective heat transfer is achieved by using a vortex and use as coolants liquid metals is a continuation of [7], which deals with modeling of mercury flow in a channel of square section.

**Key words:** numerical simulation, the conductive fluid flow rate, turbulence, the magnetic field, the Hartmann number, the Reynolds number.

### Введение

В настоящее время существуют разнообразные методы интенсификации конвективного теплообмена. Применительно к течению однофазных теплоносителей используются турбулизаторы потока на поверхности, шероховатые поверхности и поверхности, развитые за счет оребрения, закрутки потока спиральными ребрами, завихрителями, установленными на входе в канал и другие комбинированные способы. Кроме того, в современных атомных реакторах в качестве теплоносителей широко используются жидкие металлы и расплавы их солей, обладающие большой теплопроводностью - жидкие натрий, калий, литий, свинец, висмут и ртуть. Последняя выделяется тем, что в обычных условиях остаётся жидкой и необычайно подвижно и, кроме того, обладает очень высокой электропроводностью, её коэффициент электропроводности  $\sigma \sim 10^6$  См/м (для сравнения у морской воды, в среднем,  $\sigma \sim 5$  См/м). Здесь уместно подчеркнуть, что такая высокая электропроводность ртути позволяет рассматривать электромагнитное поле в качестве сильного управляющего фактора. Таковы основные предпосылки постановки задачи.

В данной работе рассматривается течение ртути в прямолинейном канале квадратного сечения при наличии вертикального однородного магнитного поля. Такого рода течения были достаточно подробно изучены экспериментально в работе [1] и именно с этими экспериментальными данными и будем сравнивать результаты тестовых расчетов. Интерес к подобной задаче вызван в первую очередь запросами атомной энергетики, энергомашиностроения, судостроения, где вопросам интенсификация теплообмена и повышению энергетической эффективности теплообменных аппаратов уделяется громадное значение.

Выполним расчет характеристик турбулентного потока ртути с помощью трех моделей турбулентности, реализуемых в ANSYS.CFX. Первой является хорошо известная « $k-\epsilon$ » модель (она содержит уравнение переноса кинетической энергии турбулентности  $k$  и уравнение переноса скорости ее диссипации –  $\epsilon$ ), второй – модель « $k-\omega$ » (где  $\omega$  – удельная скорость диссипации), а третья – это модель переноса компонент тензора напряжений Рейнольдса («SSG» – модель) [2 - 4]. Выбор этих моделей не случаен. Первая из них имеет хорошую, многолетнюю апробацию в инженерной

и научно-исследовательской работе при описании сдвиговых течений. Вторая, за счет усовершенствований пристеночных функций, внесенных Ментером [5], имеет некоторые преимущества при моделировании течений вблизи твердых стенок. Третья модель более современная и претендует на роль более информативной, т.к. в ней турбулентные напряжения находятся из решения соответствующих уровней переноса, что позволяет учитывать большинство эффектов, свойственных турбулентному течению, в частности, анизотропию. Использование трех указанных моделей позволяет произвести сравнительный анализ того, как они воспроизводят наблюдаемые в реальном эксперименте величины. А это, в свою очередь, делает более осозанным подход к выбору модели турбулентности, необходимой для расчета сложных течений, в том числе и магнитогидродинамических. Моделирование рассматриваемой задачи сводилось к решению трехмерных, стационарных уравнений магнитной гидродинамики (некоторые аспекты использованных уравнений более подробно рассмотрены в [6]), вместе с соответствующей моделью турбулентности. Расчетная область повторяет форму и размеры канала, использованного в экспериментальной работе. В ней построена сетка из гексаэдров (методом вытягивания). Использование гексагональных сеток при моделировании турбулентного течения позволяет существенно повысить точность расчетов, кроме того она значительно экономичнее тетраэдральной, а структура сеточных линий такова, что они направлены вдоль линий тока, что уменьшает ошибку при дискретизации уравнений. Для более точного моделирования турбулентного течения вблизи боковых стенок канала используется сетка с призматическим подслоем. Построено 10 слоев призм с отношением высот 1.2 и толщиной первого слоя равной 0.5 мм. Это видно на рис. 1.

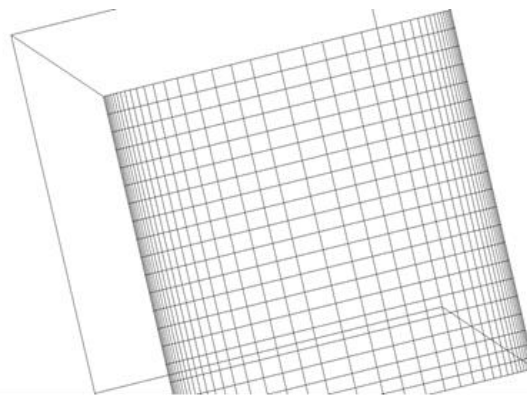


Рис. 1 Поверхностная сетка элементов прямолинейного канала.

Рассмотрим течение ртути в канале квадратного сечения с расположенными по бокам

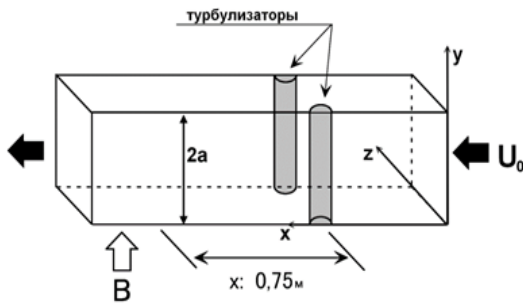


Рис. 2 Схема течения канала турбулизаторами, представляющими собой половинки цилиндров диаметром  $5 \cdot 10^{-3}$  м. Схема течения представлена на рис. 2.

При заданных скорости потока на входе в канал  $U_0=0.4$  м/с и индукции магнитного поля  $B=0.3$  Тл, течение зависит как от числа Рейнольдса, так и от числа Гартмана, а – полуширина канала ( $2a=1.7 \cdot 10^{-2}$  м.).

Проанализируем некоторые результаты численного моделирования при числе

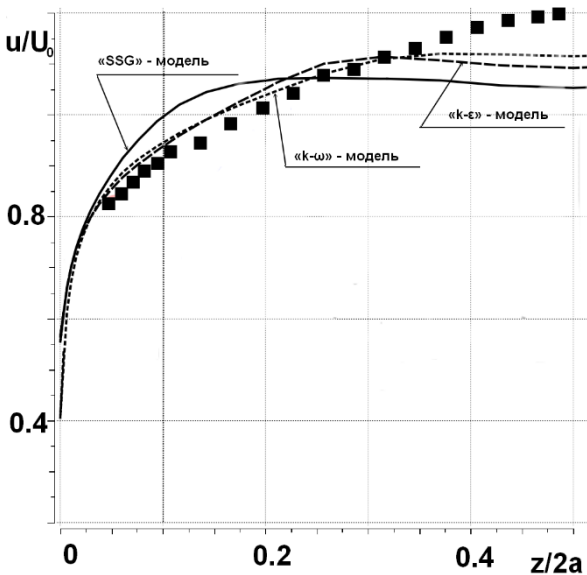


Рис. 3 Сравнение безразмерных профилей скорости при расчетах с различными моделями турбулентности. Линии – результаты моделирования, маркеры – экспериментальные данные работы [1].

Рейнольдса равном  $5.9 \cdot 10^4$  и числе Гартмана – 440 в сечении, отстоящем на расстоянии 0.75 метра от турбулизаторов вниз по потоку. Они представлены в безразмерном виде на рис. 3 и 4.

Видно достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. Наилучшее совпадение наблюдается вблизи поверхности при расчете с относительно простыми двухпараметрическими моделями Турбулентности – «к-ε» и «к-ω». Причем модель

«к-ω», которая является существенно усовершенствованной разновидностью модели

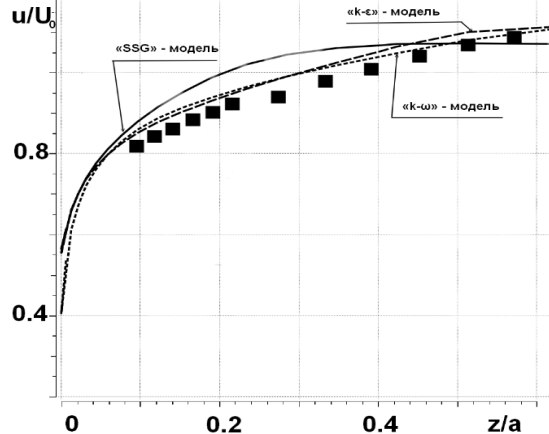


Рис. 4 Сравнение безразмерных профилей скорости при расчетах с различными моделями турбулентности вблизи стенки канала, когда координата  $z$  отнесена к полуширине канала  $a$ . Линии – результаты моделирования, квадраты – экспериментальные данные работы [1].

«к-ε», о чем говорилось выше, наиболее точно воспроизводит экспериментально наблюдаемые результаты. Это более наглядно демонстрирует график на рис.5, на котором показаны профили скорости и экспериментальные данные вблизи стенки канала.

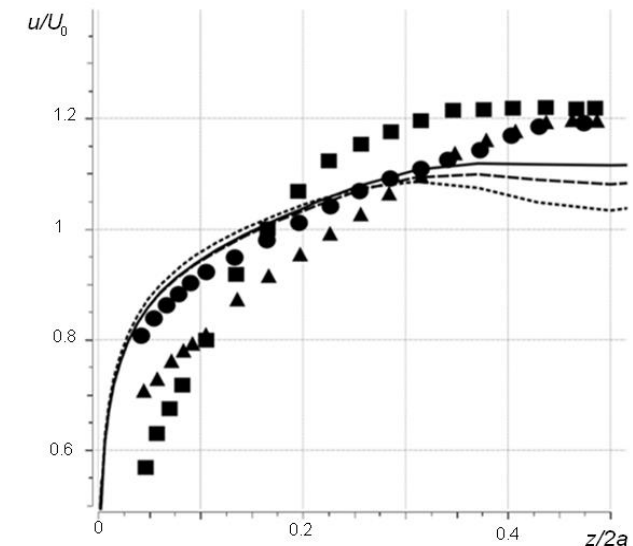


Рис. 5 Сравнение безразмерных профилей скорости при расчетах с «к-ω» моделью турбулентности и различными значениями индукции внешнего магнитного поля. Линии – результаты моделирования, квадраты, круги и треугольники – экспериментальные данные работы [1].

индукции внешнего магнитного поля  $B = 0.3, 0.5, \text{ и } 0.8$  Тл. Результаты этих расчетов показаны на рис. 5

Отличие рассчитанных значений скорости в ядре потока от экспериментально наблюдаемых, по-видимому, можно объяснить различием турбулентных масштабов. Один масштаб – геометрический – это характерный размер обтекаемого турбулизатора, второй масштаб, характеризующий магнитное поле, – силовой. Величина последнего «ответственна» за то, какие эффекты, вызывающие изменение магнитного поля, будут преобладать – индукционные или диссипативные. В моделях, реализованных в ANSYS.CFX, это различие масштабов не учитывается. При расчетах использовались именно штатные установки расчетного

комплекса, ничего «своего», связанного со спецификой данной задачи не добавлялось.

### Выводы

Проведённые расчёты показывают достаточно хорошее воспроизведение влияния магнитного поля на распределение скорости поперек канала. Такой результат лишней раз подтверждает некий «консерватизм», свойственный турбулентности, который неплохо отслеживается даже при моделировании такого сложного физического явления как турбулентное течение ртути в магнитном поле.

### Литература

1. Takahashi M. Recent Research Activities on Liquid Metal MHD Phenomena in Japan. APEX-6/FHPD Workshop. February 16-19. 1999.
2. Speziale C.G., Sarkar S., Gatski T.B. Modeling the Pressure – Stain Correlation of Turbulence. J.Fluid Mech. 1991. Vol. 227. pp 245 – 272.
3. Юн А.А. Теория и практика моделирования турбулентных течений. – М.:Книжный дом «Либроком». 2009. - 272 с.
4. Новожилов В.В., Павловский В. А. Установившиеся турбулентные течения несжимаемой жидкости. – СПб: изд-во СПбГУ, 2013. – 483 с.
5. Menter F.R. Zonal two Equation «k -  $\omega$ » Turbulence Models for Aerodynamics Flows. AIAA 93-2906.
6. Маламанов С.Ю. Численное моделирование задач о силовом взаимодействии гидродинамического и электромагнитного полей// Математическое моделирование. 2015. Том 27, номер 11, стр 56-62.
7. Маламанов С.Ю., Павловский В.А. Расчет течения проводящей жидкости в прямолинейном канале квадратного сечения// Морские интеллектуальные технологии, № 2(32), том 1 2016.

### References

1. Takahashi M. Recent Research Activities on Liquid Metal MHD Phenomena in Japan. APEX-6/FHPD Workshop. February 16-19. 1999.
2. Speziale C.G., Sarkar S., Gatski T.B. Modeling the Pressure – Stain Correlation of Turbulence. J.Fluid Mech. 1991. Vol. 227. pp 245 – 272.
3. Yun A.A. Teoriya i praktika modelirovaniya turbulentnykh techeniy. – M.:Knizhnyy dom «Librokom». 2009. - 272 s.
4. Novozhilov V.V., Pavlovskiy V. A. Ustanovivshiyesy turbulentnyye techeniya neszhimayemoy zhidkosti. – SPb: izd-vo SPbGU, 2013. – 483 s.
5. Menter F.R. Zonal two Equation «k -  $\omega$ » Turbulence Models for Aerodynamics Flows. AIAA 93-2906.
6. Malamanov S.YU. Chislennoye modelirovaniye zadach o silovom vzaimodeystvii gidrodinamicheskogo i elektromagnitnogo poley. Matematicheskoye modelirovaniye. 2015. Tom 27, nomer 11, str 56-62.
7. Malamanov S.YU., Pavlovskiy V.A. Raschet techeniya provodyashchey zhidkosti v pryamolineynom kanale kvadratnogo secheniya. Morskiye intellektu

УДК 532.517

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В ТРУБАХ С ШЕРОХОВАТЫМИ СТЕНКАМИ****Павловский Валерий Алексеевич**

Доктор физико-математических наук, профессор  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

**Чистов Алексей Леонидович**

Кандидат физико-математических наук  
Санкт-Петербургский государственный университет  
198504, Санкт-Петербург, Петергоф, Университетский просп., 35  
e-mail: chisalex@mail.ru

**Шестов Константин Викторович**

Аспирант  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: pulick76@yandex.ru

**Аннотация**

Во многих технических устройствах реализуются течения в трубах и каналах, которые осуществляются за счет создания перепада давления вдоль оси канала, что требует затрат энергии. Для оценки этих затрат необходимо знание коэффициентов сопротивления, которые зависят от режима течения и шероховатости обтекаемых поверхностей. В работе использована  $f$  – модель турбулентности, позволяющая выполнять расчеты течений в трубах и каналах с гидравлически гладкими стенками как при больших, так и при малых числах Рейнольдса. Для задач о течениях в каналах с шероховатыми поверхностями в рамках  $f$  – модели сформулированы, опираясь на результаты опытов Никурадзе, соответствующие граничные условия. Выполнены расчеты установившегося течения вязкой несжимаемой жидкости в круглой трубе шероховатыми стенками при различных числах Рейнольдса. Получены первые интегралы для профиля скорости и меры турбулентности, представляющие собой трансцендентные уравнения. Это позволяет свести рассматриваемую задачу, к решению системы алгебраических уравнений по методу Ньютона. Проведено сравнение результатов расчетов профилей скорости и коэффициентов сопротивления с экспериментальными данными Прандтля-Никурадзе.

**Ключевые слова:** течение в трубе, вязкость,  $f$  – модель, динамическая скорость, число Рейнольдса, шероховатость, перепад давления, дифференциальные уравнения, граничные условия, профиль скорости, коэффициент сопротивления.

**MODELING TURBULENT FLOW IN A ROUGH WALLS PIPE****Valeriy A. Pavlovsky**

State Marine Technical University  
Lotsmanskaya st. 3, Saint-Petersburg, Russia, 190008  
E-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

**Alexey L. Chistov**

St. Peterburg State University  
7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, Russia  
Email: chisalex@mail.ru

**Konstantin V. Shestov**

State Marine Technical University  
Lotsmanskaya st. 3, Saint-Petersburg, Russia, 190008  
E-mail: pulick76@yandex.ru

**Abstract**

In many technical devices flows in tubes and channels are realized. These flows are existed due to pressure difference that requires energy expenses. For estimations of these expences resistance coefficients must be determined depending on the regime of the flow and the roughness of wrapping surfaces. In this paper  $f$ -model are used

for calculations in tubes and channels at different Reynolds numbers. Based on the Nikuradze experimental results in *f*-model terms boundary conditions can be formulated for flows in pipe with rough walls. In a case of incompressible viscous liquid the velocity profile, the turbulent measure and resistance coefficients for turbulent flows in pipes with rough walls are obtained. The velocity profile and the turbulent measure are not expressed explicitly can be obtained as a result of solving of transcendental equations using numerical methods. The velocity profile and resistance coefficients are compared with experimental data.

**Key words:** the flow in a tube, viscosity, *f*-model, dynamic viscosity, Reynolds number, roughness, pressure difference, differential equations, boundary conditions, velocity profile, the resistance coefficient.

Рассмотрим установившееся течение в круглой цилиндрической трубе с постоянным по длине трубы градиентом давления  $dp/dx = const < 0$ , где  $x$  - осевая координата. В силу геометрии течения будем использовать цилиндрическую систему координат, причем для удобства расчетов кроме радиальной координаты  $r$  далее будет также применяться и поперечную координата, отсчитываемая от стенки трубы:  $y = R - r$ ;  $0 \leq y \leq R$ , где  $R$  - радиус трубы. При установившемся течении в прямой круговой трубе уравнение движения сплошной среды в напряжениях, справедливое для любого режима течения, приводит к следующему выражению для распределения касательного напряжения по сечению этой трубы:

$$\tau = \frac{1}{2} \frac{dp}{dx} r.$$

Для расчета течения будем использовать *f*-модель турбулентности [1], позволяющая выполнять расчеты течений в трубах и каналах с гидравлически гладкими стенками как при больших, так и при малых числах Рейнольдса. С помощью *f*-модели турбулентности можно рассчитывать поля осредненных скоростей и сопротивление независимо от того, какой режим реализуется в данном конкретном случае - ламинарный или турбулентный. Для течения в круглой цилиндрической трубе с гладкими стенками она дает результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными. Влияние шероховатости не проявляется при ламинарном режиме течения, когда происходит плавное обтекание бугорков шероховатости, в то время как в турбулентном режиме течения происходят срывы вихрей с вершин бугорков шероховатости и интенсивное перемешивание слоев движущейся жидкости.

Опираясь на результаты опытов Никурадзе [2-4] можно в рамках *f*-модели сформулировать граничные условия и для течения вблизи шероховатой стенки.

Для данного течения система уравнений, описывающих поведение несжимаемой вязкой жидкости при произвольных числах Рейнольдса согласно *f*-модели, имеет в цилиндрической системе координат следующий вид:

$$\begin{cases} -\frac{dp}{dx} + \frac{\mu}{(1-f)} \cdot \frac{d^2u}{dy^2} + \frac{\mu}{(1-f)^2} \cdot \frac{du}{dy} \cdot \frac{df}{dy} = 0 \\ \mu \frac{d^2f}{dy^2} + \mu \frac{\Psi(f)}{(1-f)} \cdot \left(\frac{df}{dy}\right)^2 - (1-f) \frac{dp}{dx} \frac{df}{dy} \Big/ \frac{du}{dy} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

В этой системе  $u = u(y)$  - скорость жидкости в рассматриваемой точке,  $p$ -давление,  $\mu$  - динамическая вязкость,  $f = f(y)$  - безразмерная скалярная величина (мера турбулентности), изменяющаяся в пределах  $0 \leq f < 1$ , причем  $f = 0$  - соответствует ламинарному режиму течения;  $\Psi(f) = \frac{2\alpha + \beta(1-f)}{\alpha + \beta(1-f)}$ , где  $\alpha = 2.5$  и

$\beta = 8.5$  - феноменологические константы.

Все величины в этих уравнениях понимаются как осредненные по Рейнольдсу (для ламинарного режима течения осредненные и мгновенные значения величин совпадают). Первое уравнение системы является уравнением движения, а второе - уравнением переноса функции *f*. Введем в рассмотрение динамическую скорость:

$$v_* = \sqrt{2R(-dp/dx)/\rho} \quad \text{и}$$

$$v_{*1} = \sqrt{|\tau_w|/\rho}, \quad \text{где } \rho \text{ - плотность жидкости, а } \tau_w \text{ - трение на стенке, которое в общем случае может быть не равным } \frac{1}{2} \frac{dp}{dx} R \text{ при}$$

наличии шероховатости. Для приведения системы уравнений к безразмерному виду следует ввести безразмерные переменные - скорость

отнести к динамической скорости  $v_*$ , а поперечную координату, отсчитываемую от стенки трубы, к диаметру трубы:

$$v = \frac{u}{v_*}, \quad \eta = \frac{y}{R}.$$

Тогда система уравнений (1) приводит к следующим двум обыкновенным дифференциальным уравнениям, описывающим движение жидкости в прямой круглой трубе:

$$\begin{cases} \text{Re}_* + \frac{1}{(1-f)} v'' + \frac{v' \cdot f'}{(1-f)^2} = 0 \\ f'' + \frac{\Psi(f)}{(1-f)} f'^2 + \text{Re}_* \cdot (1-f) \frac{f'}{v'} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

где  $\text{Re}_*$  – число Рейнольдса, вычисленное по динамической скорости:  $\text{Re}_* = \frac{2R \cdot v_*}{\nu}$ ,  $\nu$  – кинематическая вязкость, штрихи обозначают производные по  $\eta$ .

Для течения жидкости в трубе с гидравлически гладкими стенками граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} \eta = 0: \quad v = 0; \quad v' = \text{Re}_{*1}; \\ f = 0; \quad f' = \frac{\text{Re}_{*1}}{(\alpha + \beta)}, \end{aligned}$$

где  $\text{Re}_{*1}$  – число Рейнольдса, вычисленное по динамической скорости  $v_{*1}$ :

$$\text{Re}_{*1} = \frac{2Rv_{*1}}{\nu}.$$

Для шероховатых стенок с высотой бугорков шероховатости  $k$  эти условия изменяются за счет того, что при  $\eta = 0$  величина  $f$  не равна нулю, а имеет некоторое значение  $f_0$ , зависящее от числа Рейнольдса  $h_+$ , вычисленного по высоте бугорков шероховатости. Обозначим относительную шероховатость, как  $m = k/R$ , тогда можно записать:

$$f_0 = f_0(h_+), \quad h_+ = \frac{k v_*}{\nu} = m \text{Re}_*.$$

В результате краевые условия для течения в трубе с шероховатыми стенками принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \eta = 0: \quad v = 0; \quad v' = \text{Re}_{*1}; \\ f = f_0; \quad f' = \frac{\text{Re}_{*1}}{(\alpha + \beta)} \end{aligned} \quad (3)$$

Можно заметить что  $v_* = 2v_{*1}$ , а числа Рейнольдса, вычисленные по этим динамическим скоростям равны, т.е.  $\text{Re}_{*1} = \text{Re}_*$ .

Решение системы уравнений (2) с граничными условиями (3) дает профиль скорости:

$$v = \frac{(\alpha + \beta) \cdot (1 - f_0)}{\alpha + \beta(1 - f_0)} \cdot \left[ \beta(f - f_0) - \alpha \ln \left( \frac{1 - f}{1 - f_0} \right) \right], \quad (4)$$

где величина  $f$  определяется уравнением:

$$\begin{aligned} \frac{\alpha \cdot (f - f_0)}{(1 - f)(1 - f_0)} - \beta \ln \left( \frac{1 - f}{1 - f_0} \right) = \\ = \frac{\alpha + \beta(1 - f_0)}{(\alpha + \beta) \cdot (1 - f_0)} \cdot \text{Re}_* \cdot \left( \frac{\eta}{1 - f_0} - \frac{\eta^2}{2} \right) \end{aligned}$$

Анализируя известные экспериментальные данные Никурадзе [2-4] можно найти эмпирическую функцию  $f_0 = f_0(h_+)$ . Средняя по сечению скорость течения в трубе:

$$v_{cp} = \frac{u_{cp}}{v_*} = 2 \int_0^1 (1 - \eta) v d\eta \quad (5)$$

является функцией величин  $\text{Re}_*$  и  $f_0$ . Для заданного значения относительной высоты бугорков шероховатости  $m = k/R$  каждому числу Рейнольдса  $\text{Re} = \frac{2Ru_{cp}}{v}$ , вычисленному по

средней скорости (очевидно,  $\text{Re} = \text{Re}_* v_{cp}$ ) можно сопоставить свое значение коэффициента сопротивления  $\lambda$  из опытов Никурадзе. В результате решения трансцендентного уравнения

$$\lambda - 8/\nu_{cp}^2 = 0$$

каждому значению числа  $h_+$  можно сопоставить свое значение  $f_0$ . Здесь величина  $\lambda$  берется из опытов, а  $\nu_{cp}$  определяется по формуле (5).

На рис. 1 приводится график величин в координатах  $(\lg h_+, \lg(1 - f_0))$ , построенный по известным экспериментальным данным Никурадзе для чисел Рейнольдса до  $h_+ = 10^6$  и значений  $\frac{1}{m} = \frac{R}{k} = 15; 30,6; 60; 126; 252; 507$ . Можно видеть, что все экспериментальные точки ложатся на одну кривую, которая аппроксимируется формулой:

$$\ln(1 - f_0) = \begin{cases} 0, & z \leq 1,1 \\ (1,1 - z)(0,433 + 0,019z + 0,0127z^2), & z > 1,1 \end{cases}$$

(6)

где  $z = \lg h_+$ .



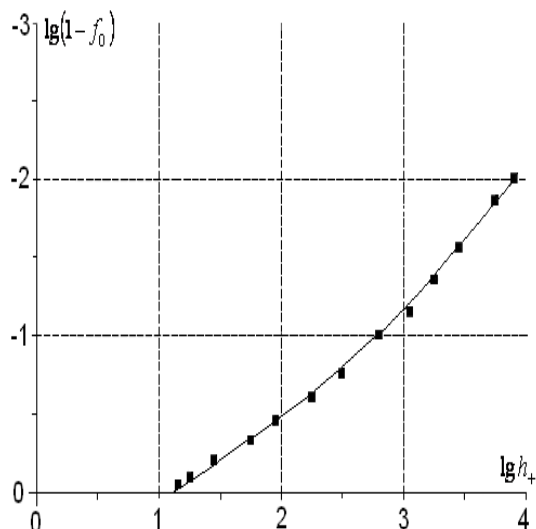


Рис. 1. Кривая зависимости  $f_0$  от  $h_+$  при различных значениях относительной шероховатости по опытам Никурадзе.

При малых числах Рейнольдса (в чисто ламинарном режиме) влияние шероховатости не сказывается.

На основе этой аппроксимации по формуле (4) можно рассчитать профили осредненных скоростей и сопротивление для течения в шероховатой трубе. Результаты таких расчетов приводятся на рис. 2 и 3. Они свидетельствуют о хорошем согласовании с опытными данными [2] и результатами полуэмпирической теории Л. Прандтля [3,4].

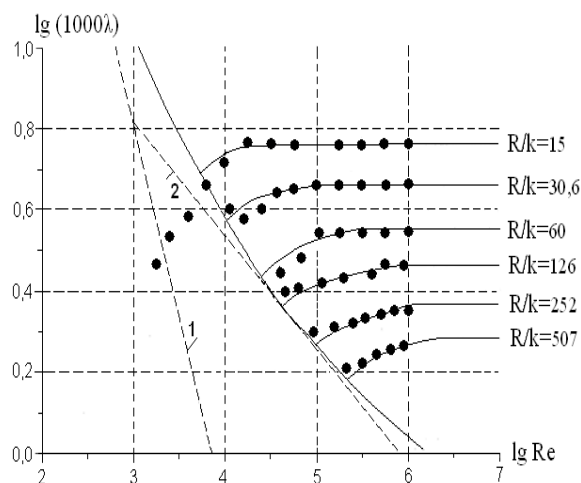


Рис. 2. Результаты расчета коэффициента сопротивления и сравнение его с экспериментом:

маркеры – опытные данные Никурадзе, пунктирные соответствуют: линия 1 - закону чисто вязкого трения, а линия 2 - формуле Блазиуса для турбулентного режима течения.

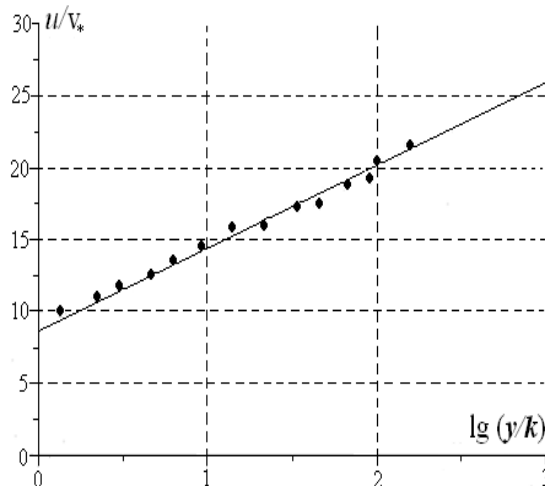


Рис. 3. Универсальное распределение скоростей в шероховатой трубе:

маркеры – рассчитаны по формуле (4) для различных значений числа Рейнольдса, сплошная линия соответствует эмпирическому уравнению

$$\frac{u}{v_*} = 5,751 \cdot \lg\left(\frac{y}{k}\right) + 8,5, \text{ согласно [3].}$$

Краевые условия (3) в сочетании с эмпирической формулой (6) позволяют рассчитывать течение жидкости вблизи гладких и шероховатых стенок аналогично тому, как это сделано в работе [5]. При этом, в случае течения в пограничном слое, в качестве характерного размера вместо радиуса трубы  $R$  следует использовать толщину этого слоя  $\delta$ .

### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-08-00890).

### Литература

1. Павловский В.А. Об одной феноменологической альтернативе гипотезе длины пути перемешивания//Модели механики сплошной среды. Сб. Физическая механика. Вып. 7/Под ред. Б. В. Филиппова. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 1998. с.21-35.
2. Nikuradze J. Stromungsgesetze in rauchen Rohren/forsh. Arb. Ing. – Wes., 1933, № 391.
3. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987 – 840 с.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука. 1969 – 742 с.
5. Павловский В.А. Учёт шероховатости стенки для единой феноменологической модели течения вязкой жидкости при произвольных числах Рейнольдса//Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на предприятиях и ТЭС. Межвуз. Сб. науч. тр./СПб ГТУ РП. СПб. 2002. с. 11-17.

### References

1. Pavlovsky V.A. Ob odnoi fenomenologicheskoi alternative gypotese dliny puti peremeshivaniya. Modeli mehaniki sploshnoi sredy. Sb. Physicheskaya mehanika. Vyp. 7. Pod red. B. V. Fillipova. Spb.: Izd-vo S.-Peterb. Univ, 1998. pp.21-35.
2. Nikuradze J. Stromungsgesetze in rauchen Rohren/forsh. Arb. Ing. – Wes., 1933, № 391.
3. Loitsanskiy L.G. Mechanika gidkosti i gaza. M.: Nauka, 1987 – 840 p.
4. Shlixtihg G. Teoriya pogranchnogo sloya. M.: Nauka. 1969 – 742 p.
5. Pavlovsky V.A. Uchet sherochovatosti stenki dlya edinoi fenomenologicheskoi modeli techeniya vyazkoi gidkosti pri proizvolnyx chislax Reynoldsa. Problemy economii toplivno-energeticheskix resoursov na predpriyatiyax i TEC. Megvuz. Sb. nauch. tr. SPb GTU RP. SPb. 2002. pp. 11-17.

УДК 536.23

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИСТЕЧЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ГАЗА ИЗ РЕЗЕРВУАРА

**Павловский Валерий Алексеевич**

Доктор физико-математических наук, профессор  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

**Мишутинский Юрий Николаевич**

Магистрант  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: ymishutinskiy@mail.ru

**Неверов Сергей Александрович**

Магистрант  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: neverov-sa@mail.ru

### Аннотация

Согласно законам термодинамики при истечении газа из резервуара температура в нём падает вместе с падением давления. Это может привести к фазовому переходу «газ-жидкость», что недопустимо и требует для исключения этого перехода выполнения специальных процедур. Они заключаются в разбиении процесса истечения на несколько временных промежутков, границы которых соответствуют состояниям газа вне области фазового перехода. В работе очерчена граница этой области и выполнены расчеты процесса истечения, разбитого на несколько этапов. В моделировании использовались термические уравнения состояния Редлиха – Квонга и Пенга – Робинсона хорошо зарекомендовавшие себя в расчете параметров реальных газов вблизи линии фазового перехода. Результаты расчетов приведены в таблицах и на графике. Показано, что обе модели газа дают сходные результаты для процесса истечения газа из резервуара при соблюдении условия исключения возможности конденсации газа.

**Ключевые слова:** реальный газ, истечение из резервуара, фазовый переход, линия насыщения, бинаodal, уравнение состояния, модель Редлиха – Квонга, модель Пенга – Робинсона, моделирование.

## MODELING OF REAL GAS TANK OUTFLOW DYNAMICS

**Pavlovsky Valery Alekseevich**

Doktor fiziko-matematicheskix nauk, professor  
Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj morskoy texnicheskij universitet  
190008, Sankt-Peterburg, ul. Locmanskaya, 3  
e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

**Mishutinskiy Yuri Nikolaevich**

Magistrant  
Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj morskoy texnicheskij universitet  
190008, Sankt-Peterburg, ul. Locmanskaya, 3  
e-mail: ymishutinskiy@mail.ru

**Neverov Sergei Aleksandrovich**

Magistrant  
Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj morskoy texnicheskij universitet  
190008, Sankt-Peterburg, ul. Locmanskaya, 3  
e-mail: neverov-sa@mail.ru

**Abstract**

According to the laws of thermodynamics when the gas flows from the tank temperature falls with the pressure drop. This may lead to a phase transfer "gas – liquid", which is unacceptable and requires special procedures to exclude such transition. They are in the fragmentation of the process of gas flow in several time intervals, boundaries of which correspond to the state of the gas which is not in the field of phase transfer. In the work outlined the boundary of this region and made the calculations of the flow process which is divided into several stages. In this calculations were used thermal equation of state of Redlich – Kwong and Peng – Robinson's which were well – proven in the study of real gases parameters near the phase transfer line. The calculation results are presented in tables and graphics. It is shown that the two gas models give similar results of the process of gas flow from the tank when the conditions excluding gas condensing capability complied.

**Key** real gas, flows from the tank, phase transition, phase diagram, Redlich – Kwong equation of state, Peng – Robinson equation of state, binodal, calculation.

Методика расчета процесса опорожнения сосуда заполненного реальным газом схожа с расчетом заполнения этого сосуда[1]. Принципиальным отличием является условие прекращения процесса опорожнения. Если при заполнении емкости остановка происходит при достижении определенного давления в сосуде при заданной температуре, то при опорожении условием остановки является охлаждение газа до точки, при которой возможна конденсация. Иначе говоря, в процессе опорожнения сосуда заполненного реальным газом кривая процесса не должна пересекать бинадаль, которая является линией фазового перехода «перегретый пар - насыщенный пар».

По имеющимся опытным данным исследования метана на линии насыщения [2] построена дробно-рациональная функция, аппроксимирующая в безразмерных координатах правую ветвь бинадаль достаточно точно для данной задачи (рис.1).

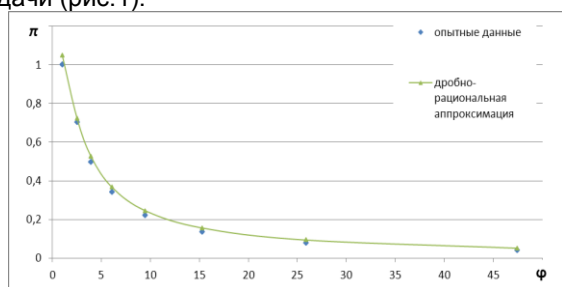


Рис. 1. График функции, аппроксимирующей правую ветвь бинадаль в безразмерных координатах.

Эта аппроксимирующая функция имеет вид:

$$\pi = \frac{1.0744\phi + 0.4612}{0.4341\phi^2 + 0.3996\phi + 0.633}$$

где  $\pi$  – безразмерное давление,  $\phi$  – безразмерный объём (обезразмеривание проведено по параметрам критической точки).

Как и в случае заполнения резервуара реальным газом, при истечении имеют место быть два режима течения – критический и докритический. Различия между этими режимами течения и их особенностями подробно описаны в работе [3]. Для их расчета использовались модели Редлиха – Квонга и Пенга – Робинсона хорошо показав-

шие себя при расчете параметров реального газа вблизи линии фазового перехода [4].

Система уравнений, описывающая динамику изменения давления  $p$ , плотности  $\rho$  и температуры  $T$  в сосуде при его опорожении состоит из трех уравнений: двух дифференциальных (баланса массы и энергии) и одного алгебраического (уравнения состояния) [3]. В случае использования двухпараметрической модели Редлиха – Квонга система уравнений имеет вид:

$$V \frac{d\rho}{dt} = -G$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{G \left( u - h - \frac{3a}{2} \frac{\rho}{(1+b\rho)\sqrt{T}} \right)}{V\rho \left( c_v + \frac{3a \ln(1+b\rho)}{4b T^{1.5}} \right)}$$

$$p = R \frac{\rho T}{1-b\rho} - \frac{a\rho^2}{(1+b\rho)\sqrt{T}}$$

где  $T$  – температура,  $t$  – время,  $p$  – давление,  $\rho$  – плотность,  $c_v$  – изохорная теплоемкость,  $V$  – объем резервуара,  $u$  – удельная внутренняя энергия,  $h$  – удельная энтальпия,  $G$  – массовый расход,  $R$  – газовая постоянная,  $a, b$  – коэффициенты модели Редлиха – Квонга. Выражения для удельных величин внутренней энергии и энтальпии, а также для массового расхода, здесь берутся такими же, как и в работе [1].

В случае использования модели Пенга – Робинсона третье уравнение этой системы имеет вид:

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a \cdot \gamma(T)}{v(v+b) + b(v-b)}$$

где  $v$  – удельный объём.

Параметр  $\gamma$  в уравнении состояния Пенга – Робинсона может отличаться в разных модификациях модели [2,5,6]. В настоящей работе модель Пенга – Робинсона использовалась в классической формулировке, с параметром  $\gamma$  вида:

$$\gamma(T) = \left( 1 + k \left( 1 - \sqrt{\frac{T}{T_k}} \right) \right)^2$$

где  $k(\omega)$  – параметр, зависящий от фактора ацентричности [2]:

$$k = 0,37464 + 1,54226 \cdot \omega - 0,26992 \cdot \omega^2$$

Внутреннюю энергию по этой модели можно представить в виде [4]:

$$u = c_v T - \frac{a}{2\sqrt{2}b} \left( \gamma(T) - \frac{d\gamma(T)}{dT} T \right) \ln \left| \frac{(\sqrt{2} + 1)b + v}{(\sqrt{2} - 1)b - v} \right|$$

По результатам численного моделирования на рисунке 2 представлен график зависимости безразмерного давления  $\pi$  от безразмерного объема  $\phi$  для динамики истечения метана из резервуара объемом 28,872 м<sup>3</sup> и площадью отверстия сопла 0,000785 м<sup>2</sup>. Начальное давление в резервуаре бралось равным 25 МПа (почти в 5 раз больше критического), температура – 293 К.

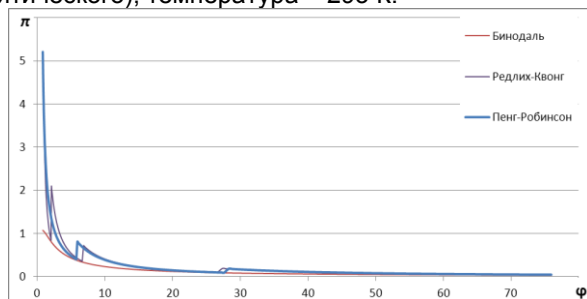


Рис. 2. Динамика истечения реального газа из резервуара по моделям Редлиха – Квонга и Пенга – Робинсона.

На рисунке 2 отчетливо видны несколько ступеней процесса моделирования истечения газа по уравнениям состояния Пенга – Робинсона и Редлиха – Квонга. Эти ступени моделирования выполнены так, чтобы кривая процесса не пересекала бинодаль - линию фазового перехода. Продолжительности каждого этапа и значения соответствующих термодинамических параметров представлены в таблицах 1 и 2. Промежутки времени между этапами используются для нагревания газа до начальной его температуры.

Таблица 1  
Результаты расчета истечения метана из резервуара по модели Пенга – Робинсона

t, сек	масса газа, кг	температура, К	давление, МПа
0	5765	293	25
419	802,6	169,7	1,85
0	802,6	293	3,864
301	168,5	152	0,43
0	168,5	293	0,868
200	61,3	189,9	0,205

Таблица 2  
Результаты расчета истечения метана из резервуара по модели Редлиха – Квонга

t, сек	масса газа, кг	температура, К	давление, МПа
0	5481	293	25
200	2261,4	184,6	3,86
0	2261,4	293	10
240	694,9	166	1,63
0	694,9	293	3,42
266	174,3	151,6	0,44
0	174,3	293	0,9
203	62,6	185,9	0,205

Видно, что обе модели дают сходные результаты для процесса опорожнения резервуара при соблюдении условия исключения возможности конденсации газа, что достигается за счет отсутствия пересечения кривой этого процесса линии фазового перехода.

### Литература

1. Павловский В. А., Чистов А. Л., Моделирование динамики заполнения резервуара реальным газом // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. Издательство: Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург) ISSN: 1811-9905. - 2014. - №3. - С. 46-57.
2. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. «Свойства газов и жидкостей». Л. Химия, 1982- 532 с
3. Павловский В.А. Введение в термодинамику реальных газов. СПб.: Изд-во Крыловского Павловский В.А., Мишутинский Ю.Н., Неверов С.А. Сравнительный анализ различных термических моделей реальных газов //МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. Научный журнал № 4 (30) Т.1 . 2015 с 72-76.
4. Павловский В.А., Мишутинский Ю.Н., Неверов С.А. Сравнительный анализ различных термических моделей реальных газов //МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. Научный журнал № 4 (30) Т.1 . 2015 с 72-76.
5. Фазовый состав и физические свойства многокомпонентных смесей в компьютерной системе HYSYS // Учебное пособие, Лисицын Н.В., Федоров В.И. Издательство СПбГТИ (ТУ). 2005- 38 с.

6. M. Farzaneh - Gord, Shahram H. and A. Farzaneh-Kord, «Thermodynamics Analysis of Cascade Reservoirs Filling Process of Natural Gas Vehicle Cylinders»// World Applied Sciences Journal 5 (2): pp.143-149, 2008.

### References

1. Pavlovskij V. A., Chistov A. L., Modeling of real gas tank fill-up dynamics // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Serija 10: Prikladnaja matematika. Informatika. Processy upravlenija. Izd: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet (Sankt-Peterburg) ISSN: 1811-9905. - 2014. - №3. - S. 46-57.
2. Reid R., Prausnitz J., Sherwood T. « The properties of gases and liquids». L. Himija, 1982- 532 s.
3. Pavlovskij V.A. Vvedenie v termodinamiku real'nyh gazov. SPb.: Izd Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra, 2013. 230 s.
4. Pavlovskij V.A., Mishutinskij Y.N., Neverov S.A. Comparative analysis of various thermal models state of real gases //MORSKIE INTELEKTUAL'NYE TEHNOLOGII. Nauchnyj zhurnal № 4 (30) T.1 . 2015 s 72-76.
5. Fazovyy sostav i fizicheskie svojstva mnogokomponentnyh smesej v komp'yuternoj sisteme HYSYS // Uchebnoe posobie, Lisicyn N.V., Fedorov V.I. Izdatel'stvo SPbGTI (TU). 2005- 38 s.
6. M. Farzaneh - Gord, Shahram H. and A. Farzaneh-Kord, «Thermodynamics Analysis of Cascade Reservoirs Filling Process of Natural Gas Vehicle Cylinders»// World Applied Sciences Journal 5 (2): pp.143-149, 2008.

УДК 534.142.1

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛЁНОЧНЫХ ТЕРМОФОНОВ****Васильев Борис Петрович**

кандидат технических наук, доцент,  
профессор кафедры физики

Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: bp\_vas@mail.ru

**Легуша Фёдор Фёдорович**

доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры физики

Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: legusha@smtu.ru

**Разрезова Ксения Васильевна**

кандидат физико-математических наук,  
младший научный сотрудник научно-исследовательской части

Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: kv\_neveselova@mail.ru

**Чижов Георгий Витальевич**

инженер ЦИТ Мёбиус

Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: gohak4@gmail.ru

**Аннотация**

Источники звука, основанные на термоакустическом эффекте (термофоны), являются нерезонансными широкополосными источниками. Для диапазона звуковых частот в качестве активных элементов (АЭ) термофонов используются тонкие плёнки, сформированные методом вакуумного напыления металлов на поверхностях несущих пластин, изготовленных из полимерных материалов. При пропускании через АЭ переменного электрического тока с частотой  $f$  происходит излучение звуковой волны на удвоенной частоте  $2f$ .

В работе представлен метод расчёта и результаты измерений параметров плёночных термофонов, АЭ которых сформированы из титана толщиной 0,34 мкм и 0,39 мкм. Несущие пластины изготовлены из стеклотекстолита и гетинакса толщиной 1,0 мм и 4,0 мм, соответственно. Все измерения проводились в воздухе на центральной оси источников звука.

Измеренные амплитудно-частотные характеристики термофонов, АЭ которых имеют прямоугольную и круглую форму, подтверждают широкополосный характер излучения термоакустических источников в диапазоне частот 2...40 кГц, что хорошо согласуется с результатами теоретических расчётов. Некоторое расхождение с теорией в области высоких частот объясняется влиянием расстояния между витками АЭ на частотную характеристику источников и может быть устранено уменьшением этого расстояния.

**Ключевые слова** Термофон, активный элемент, несущая пластина, широкополосный источник звука, звуковая волна, переменная температура, переменный электрический ток, пиковая мощность тока.

**EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON FILM THERMOPHONES****Vasilev Boris Petrovich**

associate Professor, Cand. Sc.,  
the professor of DEPARTMENT OF PHYSICS,

STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: bp\_vas@mail.ru

**Legusha Fedor Fedorovich**

the professor, Dr. Sci.Phys.-Math.,

the professor of DEPARTMENT OF PHYSICS,

STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: legusha@smtu.ru

**Razrezova Kseniya Vasilevna**

Cand. Sci.Phys.-Math.,

junior researcher of RESEARCH PART,

STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: kv\_neveselova@mail.ru

**Chizhov Georgiy Vitalevich**

engineer of CIT MEBIUS,

STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: gohak4@gmail.ru

## Abstract

The sound sources based on the thermoacoustic effect (thermophone) are non-resonant broadband sound sources. For the range of audio frequency, as the active elements (AE) are used thermophone thin film formed by vacuum deposition of metals on surfaces of bearing plates made of polymer materials. At a passage through the windings of an AC with the frequency of  $f$  there is a sound radiation at the doubled frequency of  $2f$ .

This paper presents a method for calculating the results of measurements of parameters of film thermophone, AE which are formed from titanium 0.34 microns and 0.39 microns. The carrier plates are made of fiberglass and hardened paper 1.0 mm and 4.0 mm, respectively. All measurements were taken in air in the muffled acoustic camera on an axis of gravity of sources.

The measured frequency characteristics of sources of two types, rectangular and round form, broadband character of radiation of thermoacoustic sources in a frequency range 2...40 kHz confirms that it will well be coordinated with results of theoretical calculations. Some divergence with the theory in the field of high frequencies is explained by influence of the distance between windings of structure on the frequency characteristic of sources and can be eliminated with decrease of this distance.

**Key words** Thermophone, active element, bearing plate, broadband sound source, sound wave, alternating electric current, peak current power.

## Введение

В последние десятилетия были разработаны и освоены приборостроительной промышленностью различные технологии, позволяющие формировать на поверхностях твёрдых тел очень тонкие слои, проводящие электрический ток. Такие слои обычно имеют толщину порядка десятков нанометров и могут быть использованы для создания активных элементов (АЭ) термофонов. В работе [1] впервые приводится описание плёночного термофона, АЭ которого сформирован в виде тонкого слоя алюминия, напылённого на поверхность твёрдого тела. Толщина АЭ 30 нм. Механическая прочность плёночного термофона определяется прочностными характеристиками пластины, на поверхность которой нанесён АЭ.

Плёночные термофоны являются достаточно компактными источниками звука. Это обусловлено тем, что при изготовлении термофонов на поверхностях несущих пластин не появляются какие-либо выступающие части. Малые габариты и вес плёночных термофонов позволяют предположить, что они найдут применение в качестве нерезонансных широкополосных источников звука различных мобильных устройств.

## 1. Объекты исследований

Структурная схема плёночного термофона представлена на рис. 1. АЭ термофона – 1 нанесён на верхнюю поверхность подложки – 2, которая в свою очередь закреплена на верхней поверхности несущей пластины – 3.



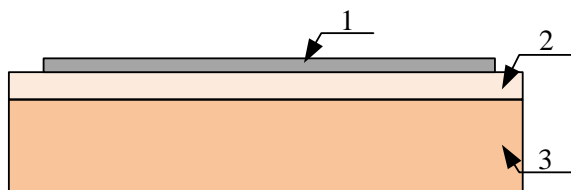


Рис. 1. Структурная схема плёночного термофона: 1 – АЭ; 2 – подложка; 3 – несущая пластина

Для повышения акустической эффективности термофона между его АЭ и поверхностью механической основы вводят теплоизоляционный слой – подложку (см. рис. 1). При изготовлении подложек чаще всего используют пористый кремний [1] или пористые полимеры [2]. Недостаток пористых подложек в том, что теплофизические параметры вещества различных подложек, изготовленных из одного и того же материала, могут сильно отличаться. На современном этапе развития термофонов было решено отказаться от подложек и АЭ формировать непосредственно на поверхности несущей пластины [3-7].

Несущая пластина термофона обеспечивает ему необходимую механическую прочность. Площадь несущей поверхности пластины делают достаточной для формирования на ней излучающей поверхности термофона. Физические параметры вещества пластины выбирают из условия обеспечения стабильной работы термофона во время его эксплуатации.

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны и изготовлены плёночные термофоны, АЭ которых имели отличающуюся форму. Вид сверху термофонов показан на рис. 2. АЭ термофонов изготавливался методом вакуумного напыления титана непосредственно на поверхности несущих пластин.

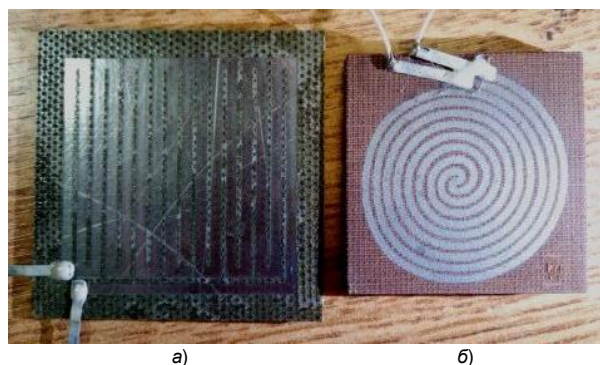


Рис. 2. Изображения плёночных термофонов

Параметры АЭ термофонов, показанных на рис. 2, представлены в таблице 1.

Таблица 1  
Геометрические параметры плёночных термофонов, использованных при проведении измерений

Параметр	Рис. 2-а	Рис. 2-б
Длина АЭ, мм	644,0	527,0
Ширина АЭ, мм	2,0	1,0

Толщина АЭ, мкм	0,34	0,39
Расстояние между витками $d$ , мм	0,5	0,5
Ширина излучающей области 2А, мм	40,0	–
Длина излучающей области 2В, мм	39,0	–

Несущие пластины термофонов изготавливались в форме квадрата со стороной 40,0 мм и 50,0 мм. Толщины пластин имели значения 1,0 мм (рис. 2-а) и 4,0 мм (рис. 2-б). Для изготовления несущих пластин использовались: стеклотекстолит и гетинакс.

Электрические контакты были изготовлены из высококачественной электротехнической меди. К поверхности АЭ термофонов контакты приклеивались при помощи специального электропроводящего клея. Для обеспечения механической прочности контактов их приклеивали к поверхности несущей пластины высокопрочным электроизоляционным клеем.

Для обеспечения излучения звука использовался режим возбуждения плёночных термофонов, при котором через АЭ пропускался только переменный ток с частотой  $f$  и, как следствие этого, излучаемая термофоном звуковая волна имела частоту  $2f$  [8].

## 2. Амплитуды звукового давления на центральной оси термофона

Будем считать, что в общем случае излучающая звук поверхность термофона, представленная на рис. 2-а, имеет прямоугольную форму. Геометрические размеры излучающей области можно записать в виде: длина  $2A_1 = 2A + \lambda_{T1}$ ; ширина  $2B_1 = 2B + \lambda_{T1}$ , где  $\lambda_{T1}$  – длина тепловой волны в среде, в которую излучается звук.

Для того чтобы наличие разрывов между проводниками не приводило к нарушению однородного распределения амплитуды колебательной скорости источника звука, на высоких частотах должно выполняться неравенство  $d < \lambda_{T1}$ , где  $d$  – расстояние между кромками параллельных проводников. При проведении расчётов мы полагаем, что амплитуда колебательной скорости постоянна по всей поверхности источника звука. Это позволяет излучающие поверхности термофона рассматривать как плоские поршневые источники звука, находящиеся в жёстком акустическом экране. Методика расчёта параметров таких источников звука хорошо известна [9, 10].

Если отношение  $A_1/B_1 \leq 1,2$ , то прямоугольный поршневой источник звука может быть заменён эквивалентным ему круглым источником, имеющим эквивалентный радиус  $r_0 = \sqrt{2A_1 \cdot 2B_1/\pi}$ . Согласно стандартной методике исследований источников звука [11] амплитуда звукового давления, создаваемого источником, регистрируется на его центральной оси. Таким образом, необходимо иметь надёжную методику оценки значений амплитуды звукового давления на центральной оси термофона.

Как показано в работах [6, 7], фактически излучение звука в плёночном термофоне обеспечивается двумя поверхностями, параллельными друг другу. Центральные оси этих поверхностей совпадают. Излучающая поверхность, находящаяся на расстоянии  $x = \lambda_{T1}$  от поверхности АЭ, создаёт за счёт термоакустического эффекта бегущую звуковую волну  $p_1(\vec{r}, t)$ , где  $\vec{r}$  – радиус-вектор, соединяющий центр источника звука с точкой наблюдения. В процессе работы термофона на вещество твёрдого тела, на поверхность которого нанесён АЭ, воздействует переменный тепловой поток. Это приводит к возникновению механических колебаний свободной поверхности тела за счёт теплового расширения вещества и, как следствие этого, к излучению бегущей звуковой волны  $p_3(\vec{r}, t)$  с поверхности АЭ ( $x = 0$ ).

В виду того, что центральные оси совмещённых источников звука совпадают, полная амплитуда звукового давления в точке  $x$  на оси термофона будет

$$p(x) = p_1(x) + p_3(x). \quad (1)$$

Для каждого из имеющихся в термофоне источников звука мы можем написать:

$$p_1(x) = 2U_{01} \rho_1 c_1 \left| \sin\left(\frac{k\alpha_1}{2}\right) \right|, \quad (2)$$

где  $\alpha_1 = \sqrt{(x - \lambda_T)^2 + r_0^2} - x$ ;

$$p_3(x) = 2U_{03} \rho_1 c_1 \left| \sin\left(\frac{k\alpha_3}{2}\right) \right|, \quad (3)$$

где  $\alpha_3 = \sqrt{x^2 + r_0^2} - x$ .

### 3. Амплитуда колебательной скорости на излучающей поверхности термофона

Нами была произведена численная оценка соотношений амплитуд колебательных скоростей материалов, из которых были изготовлены несущие пластины плёночных термофонов, которая показала, что излучением за счёт колебаний поверхности твёрдого тела можно пренебречь. Исключением является случай, когда АЭ термофона сформирован на пористой подложке.

Таким образом, формула для расчёта амплитуды колебательной скорости, входящей в выражение (2) имеет вид [4-6]

$$U_{01} = \sqrt{a_1 \omega} \beta_v T_m; \quad (4)$$

$a_1$  – температуропроводность газа,  $\beta_v = 1/273,15 \text{ K} = 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  – коэффициент теплового объёмного расширения газа,  $T_m$  – амплитуда переменной температуры поверхности АЭ.

### 4. Амплитуда переменной температуры активного элемента

Для расчёта амплитуды переменной температуры поверхности АЭ можно использовать выражение [11]

$$T'_m = \frac{q_e}{\sqrt{\omega(K_{H1} + K_{H3})^2 + (\omega\varepsilon)^2}}, \quad (5)$$

где  $q_e = p_e/S$  – удельная пиковая мощность тепловыделения активного элемента;  $p_e = R_e I_m^2$  – мощность, потребляемая термофоном;  $R_e$  – электрическое сопротивление АЭ;  $I_m$  – амплитуда переменного тока,  $S$  – площадь боковой поверхности АЭ;  $K_{H1} = \sqrt{\chi_1 \rho_1 C_{p1}}$ ;  $K_{H3} = \sqrt{\chi_3 \rho_3 C_{p3}}$ ;  $\varepsilon$  – теплоёмкость единицы площади АЭ толщиной  $h$ .

Расчёт показал, что для воздуха параметр  $K_{H1} = 5,7 \text{ Вт/м}^2\text{Кс}^{0,5}$ , для несущей пластины, изготовленной из стеклотекстолита, коэффициент  $K_{H3} = 768 \text{ Вт/м}^2\text{Кс}^{0,5}$  и для несущей пластины из гетинакса  $K_{H3} = 664 \text{ Вт/м}^2\text{Кс}^{0,5}$ . Таким образом, в случае, когда верхнее полупространство заполнено газом, выполняется неравенство  $K_{H1} \ll K_{H3}$ . Потерями тепла в верхнюю среду можно пренебречь и выражение (5) упрощается и принимает вид

$$T'_m = \frac{q_e}{\sqrt{\omega K_{H3}^2 + (\omega\varepsilon)^2}}. \quad (6)$$

## 5. Результаты измерений параметров термофонов

В процессе измерений реализована стандартная методика контроля параметров источников звука (ГОСТ 12.1.024). Основное отличие от стандартной методики микрофонов находилось на расстоянии  $x_0 = 50,0 \text{ мм}$  от центра излучающей поверхности исследуемого термофона. Кроме того, в состав стенда дополнительно были введены электронные термометры для измерения статических значений температуры воздуха в камере  $T_0$  и температуры поверхности АЭ термофона  $T_n$ .

Опыт экспериментальных исследований плёночных термофонов позволяет сделать вывод, что испытания термофонов необходимо начинать с измерений их амплитудных характеристик. Это обусловлено необходимостью уточнения значений теплофизических параметров вещества несущих пластин, на поверхностях которых нанесены АЭ. Амплитудные характеристики термофонов, несущие пластины которых изготовлены из стеклотекстолита и гетинакса, показаны на рис. 3, из которых видно, что на частоте 8,5 кГц амплитуда звукового давления линейно возрастает с увеличением мощности, потребляемой термофоном.

На рис. 3 показаны точки, в которых производились измерения амплитуды звукового давления. Значения параметра  $K_{H3}$  подбирались так, чтобы расчётные прямые ложились непосредственно на результаты измерения. Таким образом, определялись экспериментальные значения параметра  $K_{H3}$ : для стеклотекстолита  $K_{H3} = 1400 \text{ Вт/м}^2\text{Кс}^{0,5}$ , для гетинакса  $K_{H3} = 3200 \text{ Вт/м}^2\text{Кс}^{0,5}$ .

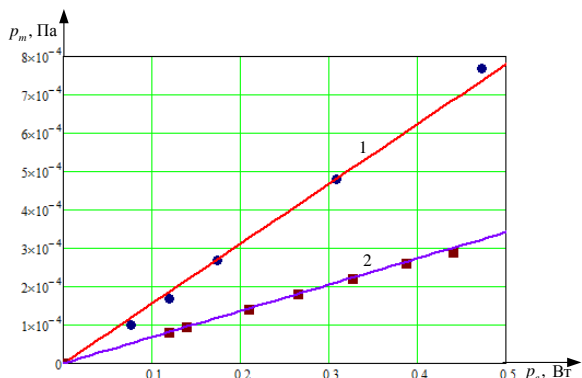


Рис. 3. Зависимость амплитуды звукового давления от мощности, потребляемой термофоном: 1 – рис. 2-а, 2 - рис. 2-б

На рис. 4 и рис. 5 показаны амплитудно-частотные характеристики термофонов, конструкции которых представлены на рис. 2. Пара-

метры плёночных термофонов, использованных при проведении измерений указаны в таблице 2.

Таблица 2  
 Параметры плёночных термофонов, использованных при проведении измерений АЧХ

Параметр	Рис. 2-а	Рис. 2-б
Электрическое сопротивление по постоянному току, Ом	664	940
Пиковая мощность, Вт	0,52	0,38
Теплоёмкость единицы площади АЭ, Дж/(м <sup>2</sup> ·К)	0,83	0,96
Нижняя граница ВЧ диапазона частот, кГц	13,8	7,7

Измерения проводились до 10,0 кГц и до 40,0 кГц. Согласно таблице 2, термофоны работали в смешанном режиме излучения звука.

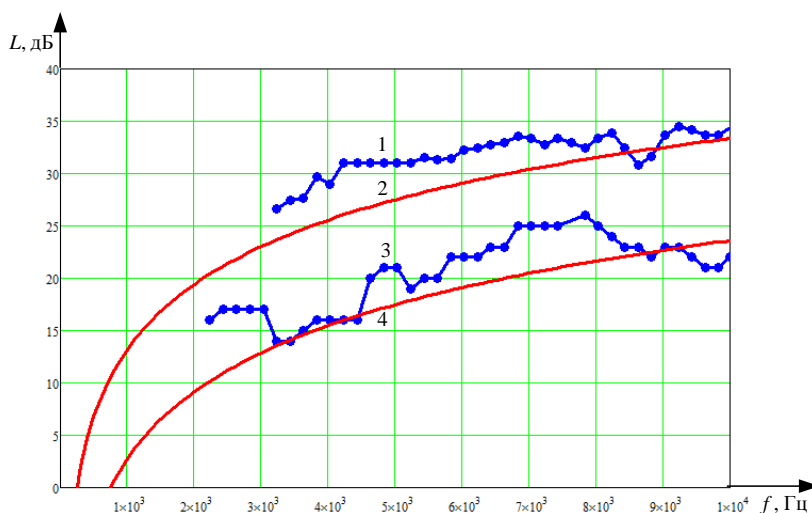


Рис. 4. Частотные зависимости уровней звукового давления: рис. 2-а: 1 – экспериментальные данные, 2 – расчёт; рис. 2-б: 3 – экспериментальные данные, 4 – расчёт

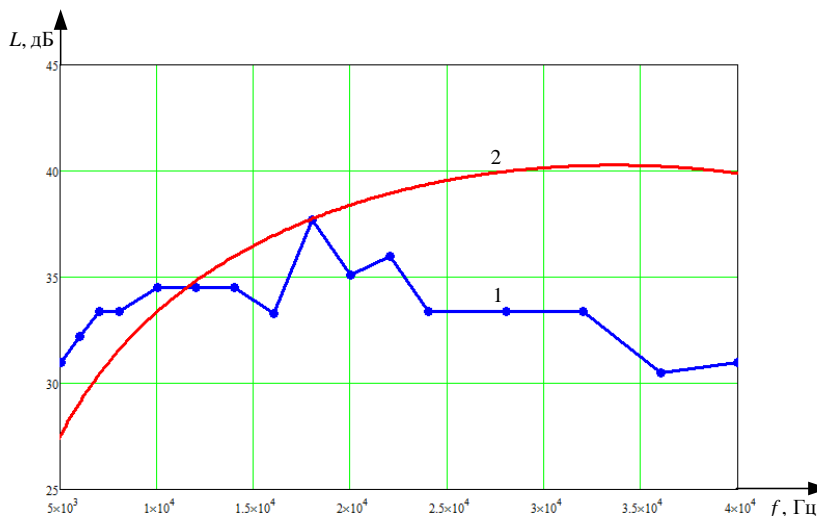


Рис.5. Частотные зависимости уровней звукового давления: рис. 2-а: 1 – экспериментальные данные, 2 – расчёт

Из рис. 4 видно, что уровни звукового давления при выбранном режиме возбуждения термофона монотонно возрастают. Результаты расчётов и измерений достаточно хорошо совпадают. Уровни звукового давления термофона, представленного на рис. 2-а, на 10...15 дБ выше уровней звукового давления термофона, представленного на рис. 2-б.

На рис. 5 представлена амплитудно-частотная характеристика термофона, несущая пластина которого изготовлена из стеклотекстолита, в диапазоне частот 5,0...40,0 кГц. Видно, что на высоких частотах наблюдается расхождение между экспериментальными данными и расчётными по уровням амплитуды звукового давления.

### Заключение

В заключении отметим, что некоторое расхождение с теорией в области высоких частот объясняется влиянием расстояния между витками АЭ на частотную характеристику источников и может быть устранено уменьшением этого расстояния.

Учитывая уникальные технические характеристики плёночных термофонов можно утверждать, что они могут быть использованы в качестве источников звука как для проведения научных исследований, так и для создания технических устройств различного назначения. Авторы приносят свою благодарность за помощь в изготовлении термофонов и активную поддержку работы С.И. Пугачёву и И.М. Старобинцу.

### Литература

1. *Shinoda H., Nakajima T., Ueno K., Koshida N.* Thermally induced ultrasonic emission from porous silicon. *Nature (London)*, Vol 400, 1999. – P. 853-855.
2. *Chitnis G., Kim A., Song S.H., Jessop A.M., Bolton J.S.* A thermophone on porous polymeric substrate. *Birck and NCN Publications*, 2012. – P. 1160.
3. *Niskanen A. O., Hassel J., Gronberg L., Helisto P.* Suspended Metal Wire Array as a Thermoacoustic Sound Source. *J. Appl. Phys. Lett.* 95(16), 2009. – p. 163102.
4. *Васильев Б.П., Легуша Ф.Ф., Невеселова К.В.* Термоакустический источник звука. *Вестник СПбО АИН*, Вып. 8. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012 г. – с.145-159.
5. *Легуша Ф.Ф., Невеселова К.В.* Широкополосные термоакустические источники звука – термофоны. *СПб.: МИТ*, № 3 (25), том 1, 2014, с. 71-77.
6. *Легуша Ф.Ф., Васильев Б.П., Невеселова К.В.* Исследование процесса излучения звука современными термофонами. *Вестник СПбО АИН*, Вып. 11. – СПб.: Изд-во Унив-та ИТМО, 2015 г. – с.11-29.
7. *Легуша Ф.Ф., Невеселова К.В.* Экспериментальные исследования современных термофонов. // *СПб.: МИТ*, № 4(30), том 1, 2015. – с. 60-65.
8. *Беранек Л.* Акустические измерения. – М.: ИЛ, 1952, – 626 с.
9. *Ржевкин С.Н.* Курс лекций по теории звука. – М.: Изд. МГУ, 1960. – 338 с.
10. *Скучик Е.* Основы акустики. Т. 2. – М.: Мир, 1976. – 548 с.
11. *Невеселова К.В.* Расчёт амплитуды переменной температуры активного элемента термофона. *СПб.: МИТ*, № 4 (26), том 1, 2014, с. 110-115.

### References

1. *Shinoda H., Nakajima T., Ueno K., Koshida N.* Thermally induced ultrasonic emission from porous silicon. *Nature (London)*, Vol 400, 1999. P. 853-855.
2. *Chitnis G., Kim A., Song S.H., Jessop A.M., Bolton J.S.* A thermophone on porous polymeric substrate. *Birck and NCN Publications*, 2012. P. 1160.
3. *Niskanen A. O., Hassel J., Gronberg L., Helisto P.* Suspended Metal Wire Array as a Thermoacoustic Sound Source. *J. Appl. Phys. Lett.* 95(16), 2009. P. 163102.
4. *Vasil'ev B.P., Legusha F.F., Neveselova K.V.* Thermoacoustic sound sources. *SPb Bulletin of Academy of Engineering Sciences*, Ed. 8. SPb.: Publ. SPB PU, 2012. P.145-159.
5. *Legusha F.F., Neveselova K.V.* Broadband thermoacoustic sources of a sound – thermophone. *SPb.: Marin intellectual technologies*, № 3 (25), v. 1, 2014. P. 71-77.
6. *Legusha F.F., Vasil'ev B.P., Neveselova K.V.* Research of the process of sound radiation by the modern thermophone. *SPb Bulletin of Academy of Engineering Sciences*, Ed. 11. SPb.: Publ. Univers. ITMO, 2015 г. P.11-29.
7. *Legusha F.F., Neveselova K.V.* Experimental investigations on modern thermophones. *SPb.: Marin intellectual technologies*, № 4(30), v. 1, 2015. P. 60-65.
8. *Beranek L.* Acoustic measurements. M.: IL, 1952. P. 626.
9. *Rzhevkin S.N.* Course of lectures on the theory of sound. M.: Publ. MSU, 1960. P 338.
10. *Skudrzyk E.* The foundation of acoustics. V. 2. M.: World, 1976. P. 548.
11. *Neveselova K.V.* Calculation of time dependent temperature amplitude of the thermophone active element. *SPb.: Marin intellectual technologies*, № 4 (26), v. 1, 2014. P. 110-115.

УДК 656.052.1

## ТРАНСПОРТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ В АРКТИКЕ

### Звягин Петр Николаевич

кандидат технических наук, доцент, доцент каф. Высшей математики старший научный сотрудник ИЦ «ЦКИ», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29;  
e-mail: pnzvyagin@gmail.com  
старший научный сотрудник Крыловского государственного научного центра,  
196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44.

### Войткунская Анна Ярославовна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Прикладной математики и математического моделирования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3;  
e-mail: vanna@list.ru

### Аннотация

При организации перевозок в Арктике требуется учитывать изменчивость маршрутов в зависимости от имеющейся ледовой обстановки. В статье рассмотрено применение и осуществлено тестирование предложенного ранее авторами алгоритма для навигационной системы, учитывающей риски при прохождении судном ледовых полей различной толщины.

Метод, примененный в статье, основан на математической модели поиска оптимального пути на сетевом графе. Для поиска наиболее экономически эффективного и наименее рискованного маршрута использован алгоритм Дейкстры. Парето-оптимальное решение для исходного графа получено при помощи применения алгоритма на модифицированном графе.

В статье продемонстрирована устойчивая работа метода для различных вариантов расположения прямоугольных льдин и разводий между ними.

При наличии экспертных оценок рисков и издержек конкретного судна на преодоление ледовых препятствий различной толщины созданные авторами программные модули могут служить основой для разработки инновационной системы навигации в условиях Арктики.

**Ключевые слова:** оптимальный маршрут, Арктика, теория графов, навигационная система, алгоритм Дейкстры, минимизация рисков, минимизация транспортных издержек, форма льдин

## ARCTIC TRANSPORTATION MODEL FOR “SMART NAVIGATION” SYSTEM

### Zvyagin Petr

Associate Professor, Ph. D., Higher mathematics department  
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University  
Polytechnicheskaya, 29, St. Petersburg 195251, Russian Federation;  
e-mail: pnzvyagin@gmail.com

Senior Scientist, Krylov State Research Centre, Moskovskoe sh., 44, St. Petersburg, 196158, Russian Federation

### Anna Voitkunskaia

Associate Professor, Ph. D., Department of Applied mathematics and mathematical modelling  
State marine technical university of Saint-Petersburg, Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation;  
e-mail: vanna@list.ru

### Abstract

Variability of routes, which are depending on current ice conditions, is a feature of transportation planning in Arctic. To each leg of such route several parameters should be assigned: transportation costs and time, maximal ice thickness on the way, risk of icebergs and other dangerous ice formations. Optimal route calculation should be considered as multicriterial optimization problem. Finding of Pareto-optimal route is desired.

In the paper the supplement is offered for transportation model, presented earlier by authors and based on graph theory and algorithms. It finds most economically effective and less risky route  $T = (x_0, x_1, x_2, \dots, x_l)$  from posi-

tion  $x_0$  to position  $x_l$  in presence of different ice formations on the map.

Tool for positioning of rectangular ice floes and fields is added and described. With this tool modeling of overlapping floes is also possible. Successful processing of such ice map with additive and minimax Dijkstra graph algorithm is demonstrated. Results are discussed.

**Key words:** optimal route, Arctic, graph theory, navigation system, Dijkstra algorithm, risk minimization, transportation costs minimization, ice floe shape

**Введение**

Моделирование прохождения судна по маршруту с использованием информации о ледовых условиях на пути следования применялось несколькими авторами. Большинство ранних моделей содержат вероятностный подход и создают оценки различных параметров, связанных с транспортировкой, таких как скорость, транспортные издержки, время и потребление горючего. В некоторых случаях параметры ледовой обстановки и качеств судна считаются имеющими стохастическую природу [1]. В других моделях [2] параметры окружающей среды считаются постоянными, при этом работу судна, потребление топлива и т.д. оценивают как функции от этих параметров.

Одна из первых систем имитационного моделирования следования судна по маршруту во льдах разработана в Лаборатории судостроения Хельсинкского технологического университета, и описана К. Риской и др. [1] в 2001 году. В 2003 году Р. Фредеркин сообщил [2] о программном обеспечении ENSIMTM Канадского центра гидравлики. Оно могло вычислять стоимость пути, который составлял пользователь на ледовой карте.

В 2009 году была представлена разработанная в VTT (Финляндия) модель для оптимизации маршрута в ледовых условиях (IRIS) [3]. Позже сообщалось [4] о вероятностной модели COSSARC поведения судна в ледовых условиях, созданной отделом Стратегических исследований и Инноваций в Det Norske Veritas. Эта модель разбивала весь интересующий путь на сегменты, а ледовые условия предполагались одинаковыми в рамках каждого сегмента. Модель предполагала сквозное прохождение ледовых полей на сегментах или преодоление линии торосов без попыток обойти эти препятствия [6].

В последнее время некоторыми исследователями (например, [7]) проявляется интерес к созданию крупномасштабных транспортных моделей для анализа экономической эффективности участков Северного морского пути, и сокращения рисков.

Во всех перечисленных моделях маршрут обычно имеет небольшое число вариантов или имеет единственный вариант.

С развитием спутниковой съемки и геолокации, и, как следствие, получением более точных сведений о состоянии ледового покрова, открываются новые перспективы для разработки транспортных навигационных систем, в

том числе и для ледовых условий. Возможность изменения маршрута в режиме реального времени, автоматическое предложение менее рискованного или экономически более эффективного пути являются желаемыми опциями навигационной системы.

Например, на рис. 1 изображен маршрут ледокола «Таймыр» [7] в ледовых условиях. Глядя на это изображение можно задаться вопросом, являлся ли выбранный капитаном путь оптимальным, или близким к оптимальному среди возможных альтернатив?

В 2016 году на международной конференции по морскому, шельфовому и арктическому инжинирингу авторами была предложена транспортная модель, основанная на алгоритмах для сетевых графов. [8] Эта модель позволяет находить маршрут, одновременно являющийся оптимальным с точки зрения транспортных издержек, и удовлетворяющий заданному ограничению уровня риска на этом маршруте. При прокладке маршрута алгоритм модели автоматически избегает труднопреодолимых препятствий, таких как толстые ледовые поля, торосы и айсберги, а также использует разводья и легко преодолимые участки ледовых полей.

В настоящей работе исследованы возможности этой модели.

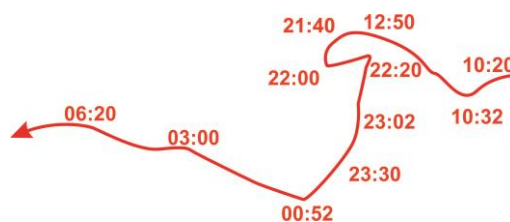


Рис. 1. Схема пути ледокола «Таймыр» 26 января 1996 г. в сложной ледовой обстановке. Дано на основе изображения, приведенного в [9]. Цифры – время суток.

**1. Способы задания сетки на карте**

Успеху решения задачи отыскания оптимального маршрута в значительной мере способствует выбор способа задания сетевого графа на карте. Для задания такого графа может использоваться ледовая карта, снабженная обозначениями о толщине и сплоченности льда типа [9].

В программном обеспечении ENSIMTM [2] пользователь задавал ряд вершин графа, просто указывая точки на карте. Например, капи-

тан может выбрать ключевые точки маршрута, основываясь на своем опыте.

Следует отметить, что задание слишком частых ячеек на карте позволит более точно построить оптимальный маршрут, но может сильно замедлить процесс его решения даже при использовании мощных вычислительных средств. И наоборот, задание редкой сети узлов может способствовать появлению нерациональных или ошибочных с точки зрения судоводителя результатов.

В работе авторов [8] рассматривалась прямоугольная сетка с вертикальными, горизонтальными и диагональными ребрами.

Вершинами  $x_i$  являются пересечения линий сетки, составляющие множество  $X$ . Ребра, которыми они соединены друг с другом, составляют множество  $A$ . Таким образом получается заданным граф  $G(X, A)$ . Для мелководья те ребра, которые проходят по глубинам, недостаточным для прохождения судна, должны быть исключены из графа  $G(X, A)$ . Область карты, описываемая графом, должна включать не только область желаемого пролегания маршрута, но и некоторую прилегающую область для возможного маневрирования.

## 2. Поиск оптимального маршрута по двум критериям

Алгоритм, предложенный в работе [8] авторов основан на решении однокритериальных задач оптимизации маршрута.

Обозначим  $T_{SF}^1$  маршрут из стартовой вершины графа  $x_S$  к конечной вершине  $x_F$ , который содержит  $l$  ребер:

$$T_{SF}^1 = (x_0, x_1, x_2, \dots, x_l); \quad |T_{SF}^1| = l.$$

Обозначим  $w_1(x_i, x_{i+1})$  вес ребра между вершинами  $x_i$  и  $x_{i+1}$ , определяющий экономическую стоимость перехода судна между этими двумя вершинами, а  $w_2(x_i, x_{i+1})$  – вес этого же ребра, определяющий риск для судна, связанный с переходом по этому ребру. Параметром  $w_2$  может служить также максимальная толщина льда на пути, соответствующем этому ребру.

Для каждого из возможных маршрутов введем две целевые функции.

Первая целевая функция определяет стоимость пути, то есть – сумму всех издержек (время, затраты топлива и т.д.), связанных с проходом по маршруту  $T_{SF}^1$ :

$$W_1(T_{SF}^1) = \sum_{i=0}^{l-1} w_1(x_i, x_{i+1}), \quad (1)$$

Вторая целевая функция определяет максимальный риск на маршруте  $T_{SF}^1$ :

$$W_2(T_{SF}^1) = \max w_2(x_i, x_{i+1}), (x_i, x_{i+1}) \in T_{SF}^1. \quad (2)$$

Этот тип целевой функции оказывается особенно важным в случае, если капитан судна хочет по экономическим причинам минимизировать помощь ледокола, требующуюся на маршруте.

Задача оптимизации ставится как задача минимизации одновременно функций (1) и (2) по всем возможным маршрутам. Пусть всего на графе  $G(X, A)$  может быть сгенерировано  $k$  различных маршрутов из стартовой вершины к конечной вершине. Тогда искомые значения целевых функций, соответственно (1) и (2) будут:

$$W_1(T_{SF}^{\min 1}) = \min_{j=1..k} W_1(T_{SF}^j),$$

$$W_2(T_{SF}^{\min 2}) = \min_{j=1..k} W_2(T_{SF}^j),$$

а  $T_{SF}^{\min 1}$  и  $T_{SF}^{\min 2}$  – оптимальные маршруты относительно функций (1) и (2) соответственно. Целевую функцию (1) будем называть аддитивным критерием, а целевую функцию (2) – минимаксным.

Может случиться так, что один маршрут  $T_{SF}^{\min 1}$  будет оптимальным относительно аддитивного критерия, а другой маршрут  $T_{SF}^{\min 2}$  будет оптимальным относительно минимаксного.

Для решения задачи оптимизации в [8] применим алгоритм Дейкстры [10]. Этот алгоритм пригоден как для оптимизации по аддитивному критерию, так и по минимаксному.

Решения, получаемые при применении алгоритма Дейкстры с использованием аддитивного и минимаксного критериев по отдельности, в общем случае являются слабо Парето-оптимальными. То есть при фиксированном значении целевой функции (1)  $W_1 = a$  могут иметься разные варианты для значений целевой функции (2)  $W_2$ . И наоборот: при фиксированном значении  $W_2 = b$  могут существовать различные варианты для  $W_1$ .

Отыскание Парето-оптимального (или сильно оптимального по Парето) решения возможно при помощи изменения структуры графа  $G$  [8]. Поскольку алгоритм Дейкстры гарантирует отыскание пути  $T_{SF}^{\min 2}$ , который имеет минимум функции (2), используем найденное значение  $W_2(T_{SF}^{\min 2})$  как условие реструктуризации исходного графа  $G(X, A)$ .

Исключим из  $G(X, A)$  множество  $A^*$  ребер, значения весов  $w_2$  для которых будут больше  $W_2(T_{SF}^{\min 2})$ . Новый граф  $G^*(X, A \setminus A^*)$  описывает область, где нет льда, который был бы толще, чем  $W_2(T_{SF}^{\min 2})$ .

Далее применим алгоритм Дейкстры на графе  $G^*(X, A \setminus A^*)$  с аддитивным критерием. Решение, полученное с использованием принципа независимости по предпочтению [11] аддитивного и минимаксного критериев, Парето-оптимально.

Найденное Парето-оптимальное решение имеет наименьшую транспортную стоимость при минимальной возможной толщине льда на маршруте.

### 3. Программная реализация

Вычислительная сложность примененного алгоритма не превышает  $O(n^2)$  [12], где  $n$  – число вершин графа. Увеличение числа узлов приводит к увеличению расчетного времени.

В созданный комплекс программных модулей, написанных авторами на языке C++, входят процедуры создания сетевого графа с прямоугольными ячейками и процедуры выполнения алгоритма Дейкстры для минимизации функций (1) и (2) на созданном графе.

Ускорение процесса вычислений может быть достигнуто за счет дальнейшей оптимизации кода или распараллеливания вычислений для многопроцессорных систем.

Для тестирования модели льдины задавались в виде прямоугольников. Каждая льдина описывалась (рис. 2) следующими характеристиками: толщина льда  $h$ , координаты нижнего угла  $(x_0, y_0)$ , длины сторон  $l_1$  и  $l_2$ , и угловой коэффициент  $k = \tan \alpha$  стороны 1. Стороны прямоугольной льдины задавались уравнениями:

$$\begin{cases} y_1 = k(x - x_0) + y_0, \\ y_2 = y_0 - \frac{(x - x_0)}{k}, \\ y_3 = k(x - x_0) + y_0 + l_2\sqrt{1 + k^2}, \\ y_4 = -\frac{(x - x_0)}{k} + y_0 + \frac{l_1\sqrt{1 + k^2}}{k}. \end{cases}$$

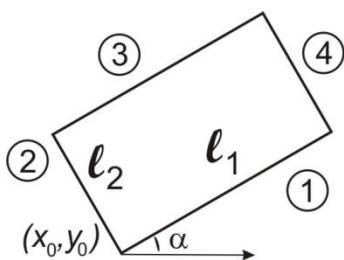


Рис. 2. Параметры модели прямоугольной льдины.

### 4. Тестирование

Пример работы транспортной модели на карте, где присутствуют прямоугольные льдины, приведен на рис. 3. Карта покрыта прямоугольной сеткой, причем расположенные по диагонали друг относительно друга вершины также соединены ребрами. Для удобства изображения диагональные ребра на рис. 3 не показаны.

Алгоритм Дейкстры, минимизирующий лишь максимальную толщину льда (2) на маршруте, строит путь, далекий от оптимального с точки зрения транспортных издержек. Этот маршрут на рис. 3 показан синей пунктирной линией.

Маршрут, найденный алгоритмом Дейкстры, минимизирующем целевую функцию длины пути на модифицированном графе  $G^*(X, A \setminus A^*)$ , не содержащем проходящих через льдины ребер, изображен на рис. 3 зеленой линией. Этот маршрут является Парето-оптимальным. Время вычисления представленных маршрутов составляет менее секунды.

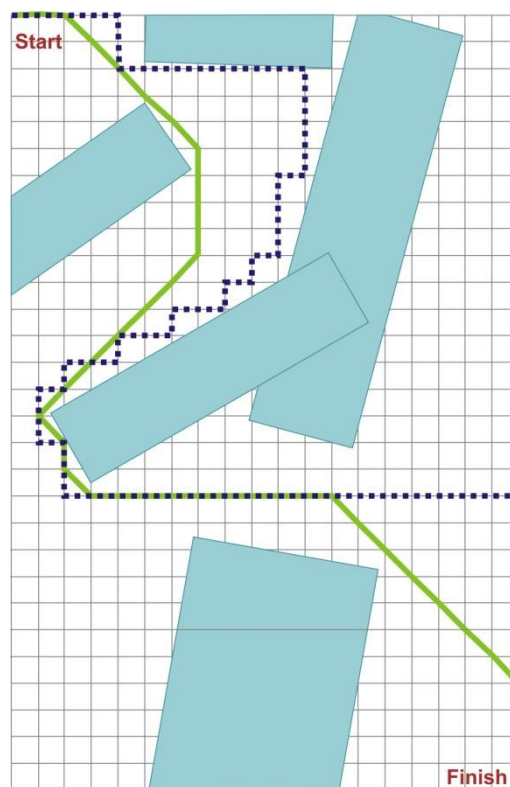


Рис. 3. Пример автоматического поиска маршрута на карте, заполненной прямоугольными льдинами.

Предложенный алгоритм допускает включение эвристических ограничений, обусловленных требованиями эксплуатационной безопасности. Так на рис. 3 имеется фрагмент маршрута, касающийся ледового поля. Для модификации маршрута на этом участке можно добавить условие, не допускающее приближения



судна к ледовому полю на заранее заданное расстояние.

### Выводы

Поиск оптимального маршрута является важной задачей планирования транспортных систем в Арктике. Эта задача имеет особенности по сравнению с поиском оптимального пути на свободных ото льда акваториях: каждому участку маршрута присваивается несколько параметров – длина, толщина льда, его сплошность и т.д. К настоящему времени за ру-

бежом создано несколько коммерческих программных комплексов для оптимизации маршрутов следования судов в ледовых условиях.

В статье рассмотрено применение разработанных ранее авторами программных модулей для случая льдин, описываемых прямоугольниками различных размеров.

Транспортная модель, основанная на графовых алгоритмах, может успешно служить основой для создания «умных» навигационных систем, рекомендующих капитану наиболее выгодный маршрут в автоматическом режиме.

### Литература

[1] Riska, K. Patey, M. Kishi, S., Kamesaki, K. (2001) Influence of ice conditions on ship transit times in ice. *Proc. 16th POAC Conf., Ottawa, Ontario, Canada. Vol II*, pp. 729-745.

[2] Frederking, R. (2003) A model for ship routing in ice. *Proc. 17th POAC Conf., Trondheim, Norway, USA. Vol II*, pp. 467-476.

[3] Kotovirta, V., Jalonen, R. Axell, L., Riska, K. and Berglund, R. (2009) A system for route optimization for ice-covered waters. *Cold Regions Science and Technology*, 55(1), pp. 52-62.

[4] Valkonen, J., Grunde, L., Eide, M.S., Walter, E.L. (2013) COSSARC – Concept Selection for Shipping in the Arctic. *Proc. 32nd OMAE Conf., Nantes, France, OMAE2013-10063*, 10 p.

[5] Valkonen, J., Riska, K. (2014) Assessment of the feasibility of the Arctic sea transportation by using ship ice transit simulation. *Proc. 33rd OMAE Conf., San Francisco, California, USA, OMAE2014-24188*, 10 p.

[6] Bergstrom, M., Ehlers, S., Erikstad, S.O., Erceg, S. Bambulyak, A. (2014) Development of an approach towards mission-based design of arctic maritime transport system. *Proc. 33rd OMAE Conf., San Francisco, California, USA, OMAE2014-23848*, 8 p.

[7] Johannessen, O. M., Sandven, S., Pettersson, L. H., Kloster, K., Hamre, T., Solhaug, J, Volkov, A. M., Asmus, V., Milekhin, O. E., Krovotyntsev, V. A., Grischenko, V.D., Smirnov, V.G., Bobylev, L.P., Melentyev, V.V., Alexandrov, V. (1997) ICEWATCH – Real-time Sea Ice Monitoring of the Northern Sea Route using Satellite Radar Technology. *Geoscience and Remote Sensing, IGARSS '97. Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development., 1997 IEEE International, vol.4, p.1681 - 1685*

[8] Zvyagin, P. Voitkunskaia, A. (2016) Model of transit transport in Arctic based on graph algorithms. *Proc. 35th OMAE Conf., Busan, South Korea, OMAE2016-54439*, 6 p.

[9] U.S. National Ice Center. Ice Chart Symbolology (2015) [Online].

[http://www.natice.noaa.gov/products/egg\\_code.html](http://www.natice.noaa.gov/products/egg_code.html)

[10] Кормен, Т. Лезерсон, Ч., Ривест, Р. (2000) Алгоритмы. Построение и анализ. М., МЦНМО, 893 с

[11] Лотов, А.В., Поспелова, И.И. (2008) Многокритериальные задачи принятия решений. М., Изд. МГУ им. М.В. Ломоносова, 197 с.

[12] Седжвик, Р. (2011) Алгоритмы на C++. Фундаментальные алгоритмы и структуры данных М., Вильямс, 1056 с.

### References

[1] Riska, K. Patey, M. Kishi, S., Kamesaki, K. (2001) Influence of ice conditions on ship transit times in ice. *Proc. 16th POAC Conf., Ottawa, Ontario, Canada. Vol II*, pp. 729-745.

[2] Frederking, R. (2003) A model for ship routing in ice. *Proc. 17th POAC Conf., Trondheim, Norway, USA. Vol II*, pp. 467-476.

[3] Kotovirta, V., Jalonen, R. Axell, Riska, K. and Berglund, R. (2009) A system for route optimization for ice-covered waters. *Cold Regions Science and Technology*, 55(1), pp. 52-62.

[4] Valkonen, J., Grunde, L., Eide, M.S., Walter, E.L. (2013) COSSARC – Concept Selection for Shipping in the Arctic. *Proc. 32nd OMAE Conf., Nantes, France, OMAE2013-10063*, 10 p.

[5] Valkonen, J., Riska, K. (2014) Assessment of the feasibility of the Arctic sea transportation by using ship ice transit simulation. *Proc. 33rd OMAE Conf., San Francisco, California, USA, OMAE2014-24188*, 10 p.

[6] Bergstrom, M., Ehlers, S., Erikstad, S.O., Erceg, S. Bambulyak, A. (2014) Development of an approach towards mission-based design of arctic maritime transport system. *Proc. 33rd OMAE Conf.*, San Francisco, California, USA, OMAE2014-23848, 8 p.

[7] Johannessen, O. M., Sandven, S., Pettersson, L. H., Kloster, K., Hamre, T., Solhaug, J, Volkov, A. M., Asmus, V., Milekhin, O. E., Krovotyntsev, V. A., Grischenko, V.D., Smirnov, V.G., Bobylev, L.P., Mentyev, V.V., Alexandrov, V. (1997) ICEWATCH – Real-time Sea Ice Monitoring of the Northern Sea Route using Satellite Radar Technology. *Geoscience and Remote Sensing, IGARSS '97. Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development., 1997 IEEE International, vol.4, p.1681 - 1685*

[8] Zvyagin, P. Voitkunskaia, A. (2016) Model of transit transport in Arctic based on graph algorithms. *Proc. 35th OMAE Conf.*, Busan, South Korea, OMAE2016-54439, 6 p.

[9] U.S. National Ice Center. Ice Chart Symbolology (2015) [Online].

[http://www.natice.noaa.gov/products/egg\\_code.html](http://www.natice.noaa.gov/products/egg_code.html)

[10] Cormen, T. H., Leiserson, C.E., Rivest, R.L. (1990) Introduction to Algorithms. The MIT Press, 1292 p.

[11] Lotov A.V., Pospelova, I.I. (2008) *Mnogokriterialnye zadachi prinyatia reshenij*. Moscow, Moscow State University publishing, 197 p.

[12] Sedgewick, R., Wayne, K. (2011) Algorithms, 4th Edition. Pearson Education, 976 p.

**УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

УДК 316.477

**ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В СУДОСТРОИТЕЛЬНОМ ОБРАЗОВАНИИ****Голованова Оксана Владимировна**

кандидат философских наук, доцент кафедры философии и социологии  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: tibidabo@yandex.ru

**Солдатов Александр Васильевич**

доктор философских наук, профессор, заведующий кафедрой философии и социологии  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: soldatov2012@yandex.ru

**Солдатов Андрей Александрович**

кандидат социологических наук, доцент кафедры философии и социологии  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: soldatov2012@smtu.ru

**Аннотация**

Статья посвящена проблемам управления в вузе кораблестроительного профиля и возможностям социологического менеджмента в сфере судостроительного образования на примере Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. В качестве эмпирического материала в статье используются данные, полученные студентами научного кружка СНО «Социолог» кафедры философии и социологии СПбГМТУ в ходе социологических опросов. Программа рекомендуемых управленческих маневров выстраивается в русле ресурсосберегающего подхода вокруг таких служебных конструктов как потребительское поведение в сфере образования, референтный образ студента, корпоративная символика, целевой студенческий контракт, институт наставничества, профессиональная идентичность, лояльность выпускников вуза. Потоки активности студентов были условно разделены на три вектора Абитуриент, Студент, Выпускник и соответственно были поставлены три блока управленческих задач: управление мотивацией абитуриентов, управление мотивацией к обучению студентов и управление процессом трудоустройства выпускников.

**Ключевые слова:** социология управления, социологический менеджмент, судостроительное образование, экономический кластер, практически ориентированное образование, референтный образ студента, целевой студенческий контракт, профессиональная идентичность.

**THE PROBLEM OF MANAGEMENT IN THE SHIPBUILDING EDUCATION****Golovanova Oksana Vladimirovna**

Ph. D., an assistant of professor of department of philosophy and sociology  
State Marine Technical University of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya,3, Saint-Petersburg, 190008, Russian Federation,  
e-mail: tibidabo@yandex.ru

**Soldatov Aleksandr Vasilevich**

Dr. Sci., professor, the head of the department of philosophy and sociology  
State Marine Technical University of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya,3, Saint-Petersburg, 190008, Russian Federation,  
e-mail: soldatov2012@yandex.ru

**Soldatov Andrei Aleksandrovich**

Ph., D., an assistant of professor of department philosophy and sociology  
State Marine Technical University of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya,3, Saint-Petersburg, 190008, Russian Federation,  
e-mail: soldatov@smtu.ru

## Abstract

The article is devoted to the problem of management at the institute of higher education of shipbuilding type and opportunities of the sphere of shipbuilding education as for example at St. Petersburg State Marine Technical University. In the article the data are used as empirical material obtained by the members of the Students Scientific Society "Sociologist" at the department of Philosophy and Sociology of the SMTU in the course of sociological questionnaires.

The programme of the recommended management manoeuvres is aimed at the resource saving approach around, such working constructors as consumers' behaviour in the sphere of education, referent student's image, corporative symbolism, purpose student contact, institute of institute of tutorship, professional identity, loyalty of the final year students. The student's activity streams were conventionally divided into three vectors: school leaver, undergraduate, final year student and accordingly three blocks of management tasks were proposed: management by motivation for training of the students and management by the process of placing in a job of the final year students.

**Key words:** sociology of management, sociological management, shipbuilding education, economic cluster, practically oriented education, referent student's image, purpose student contract, professional identity.

Социологическое образование в сегодняшнем экономически ориентированном мире может выжить, сохраняя свой кадровый и дисциплинарный потенциал, лишь найдя определенный баланс между своей неутилитарной гуманитарной миссией и своей прикладной экспертно-аналитической функцией в отношении различных социальных групп, запрашивающих и оплачивающих подобные услуги. Причем, на рынке экспертных и аналитических услуг у социально-гуманитарных дисциплин нет никаких привилегий, хотя они отчасти еще сохраняются в образовательной сфере, где их наличие оправдывается общественной значимостью мировоззренческой роли гуманитарного знания. В экономическом же отечественном ландшафте сформировался набор негативных факторов, тормозящих развитие прикладных, конструктивно-проектных функций социологии.

Во-первых, это отсутствие традиционных для западного общества практик этических комитетов и других форм гуманитарной экспертизы для различных научно-технологических инноваций с соответствующими статьями финансирования, заложенными в бюджет реализовываемых проектов. Во-вторых, волна менеджмента, захватившая в последнее десятилетие отечественные социальные организации, была обжита государственной бюрократией и экономистами. Именно они создали в этой сфере спрос на свои услуги, подчинив управление политическим и целесообразным мотивам, ценностно-рациональные же аспекты искусства управления, приближающие его к совершенству принципов самоорганизации, остались маловостребованными в культуре отечественных организаций. Это негативно отражается прежде всего на состоянии самих организаций, так как в сложившихся управленческих процессах приоритетными остаются модели эффективного использования наличных кадровых ресурсов, а не их активного формирования; социальный капитал работников или учащихся также по большей части не развивается и не актуализируется. Подчеркнем, однако, что способность выявлять условия формирования эффекта си-

нергии (взаимоусиления) социальной группы и индивидов — это сфера приложения умений именно социолога, его специфицирующая профессиональная компетенция. Социологи могут проявить себя на этом поприще и занять соответствующее место на рынке профессиональных услуг. Лидером в этом процессе могли бы стать отечественные университеты, все еще сохраняющие статус интеллектуальных и культурных центров и располагающие собственным сектором социологии (факультет, выпускающая кафедра, социологическая лаборатория).

Некоторый опыт осуществления подобной инновации имеется у кафедры философии и социологии Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. С 2014 года в рамках деятельности научного кружка СНО «Социолог» студенты под руководством заведующего кафедрой, профессора А.В. Солдатова стали разрабатывать «Программу анализа студенческого контингента университета» на основе социологических методов сбора данных. Ключевыми факторами актуализации этого направления деятельности кафедры были запросы руководства на мониторинг ситуации и озабоченность студентов социологов относительно своего будущего профессионального призвания. Предмет исследования - выявление основных тенденций активности студентов и выпускников, возможностей управления её развитием. Основная цель - создание адекватной мотивационной среды в университете посредством формирования положительной профессиональной идентичности (сращивание личности с интеллектуальными, эмоциональными, ценностно-смысловыми и телесно-соматическими требованиями своей профессионально-социальной роли) у учащихся, и, в конечном счете, - повышение эффективности функционирования университета.

В рамках данного проекта было проведено два социологических опроса «Образ современного студента» (апрель — май 2015, количество опрошенных 588) и «Мотивация студентов при выборе вуза» (октябрь 2015, количество опрошенных 409). В течение двух лет осуществлялся

мониторинг трудоустройства выпускников факультета кораблестроения и океанотехники 2014 и 2015 гг. В 2016 г. две выпускные аттестационные работы бакалавров, участников кружка, были посвящены исследованию проблематики, примающей к задачам проекта: «Стратегии профориентационной деятельности в вузе на примере СПбГМТУ» и «Целевая форма обучения в условиях освоения вузом кластерной модели экономики на примере СПбГМТУ». Полученные результаты были обнародованы в газете «За кадры Верфям», представлены в докладах на научных конференциях, отчеты по исследованиям были переданы руководству университета. («За кадры верфям», №3 (2550), март 2016).

Потоки активности студентов и соответствующие гипотетические потоки обратной связи и управления были условно разделены на три вектора: Абитуриент, Студент, Выпускник. Теоретической основой исследования является ресурсосберегающая стратегия: выявление организационных условий для привлечения профессионально мотивированных абитуриентов, противодействие рассеянию когнитивной и трудовой активности студентов в процессе освоения основной образовательной программы и направление её в русло профессиональной идентичности посредством организации профессиональной трудовой деятельности (на контрактной основе) студентов уже в процессе обучения, поиск возможных форм заинтересованности успешных выпускников в судьбе университета и позиционировании его (университета) интересов в экономической и политической среде. Соответственно, выделяются три блока управленческих задач: управление мотивацией абитуриентов при выборе вуза, управление мотивацией к обучению и формированию профессиональной идентичности у студентов, управление процессом трудоустройства и мотивацией выпускников к дальнейшему сотрудничеству с университетом. (Рис.1)

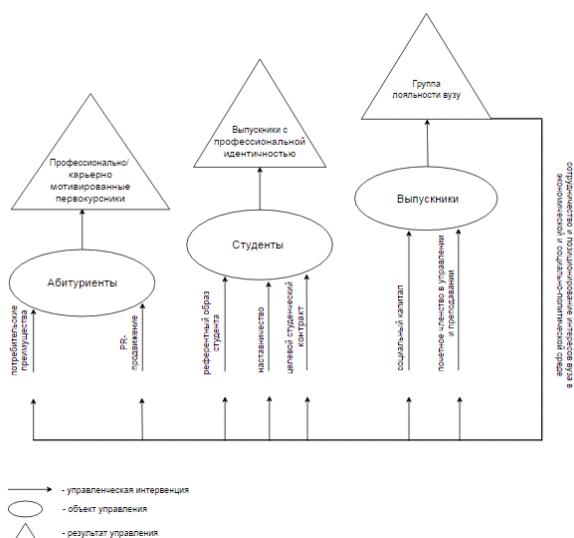


Рис.1. Мотивационная среда учащихся в вузе

За два года были получены некоторые значимые результаты, сформулированы предварительные рекомендации, определены соответствующие управленческие маневры. Мотивация абитуриентов при выборе вуза носит многослойный характер: параллельно с традиционно ключевыми факторами - престижность вуза (отметили 10,3%), качество образования (10%), привлекательность профессии (12,5%) - значимыми становятся вспомогательные социальные преимущества, предоставляемые вузом. Как выяснилось, для СПбГМТУ — это наличие военной кафедры (37,4%), территориальный фактор (близость к месту проживания — 19,3%), возможность целевого обучения (7,3% выборки обучаются на бюджетно-целевой и внебюджетно-целевой основе). Их доля в структуре мотивации становится преобладающей, что свидетельствует о вполне сформировавшейся в этой сфере модели потребительского поведения. [1. С. 45 - 46]

**Управленческий маневр:** Притоком абитуриентов можно управлять, во-первых, расширяя список «предоставляемых услуг» и бонусов: ухоженная прилегающая территория, разветвленная спортивно-досуговая инфраструктура, модернизированное общежитие, для лучших студентов - возможность стажировок на ведущих предприятиях отрасли и у зарубежных партнеров, расширение сети предприятий-партнеров по целевой контрактной форме обучения. Во-вторых, абитуриентов и их родителей может привлечь формирование особого, привлекательного с позиций преобладающих молодежных трендов (перфекционизм и брендомания), референтного образа студента Корабелки. Референтный образ - это устойчивый комплекс характеристик, органически сочетающихся с определенным образом жизни,

реализованным в поведении нормативных представителей группы, с которым стремятся отождествлять себя остальные её члены. Референтный образ может быть вынесен за границы группы, что не желательно, так как снижает степень её интегрированности и сплоченности. Важно, чтобы нормативные герои существовали внутри группы, улучшая её функционирование и привлекая к группе новых адептов. Формирование и функционирование референтного образа должно сопровождаться эффективной PR-компанией по трансляции этого образа в адресные аудитории потенциальных абитуриентов и работодателей.

Для СПбГМТУ этот образ может оформляться и культивироваться на стыке трех архетипов: человека знания (стилевой примат математической рефлексии и технической рациональности), человека военного (примат дисциплины и державного статуса), человека открывателя, влюбленного в морскую стихию и способного интерактивно с ней взаимодействовать. Искомый образ требует конвергенции образов морского инженера, морского офицера и любителя морских приключений. Объединение дисциплинированности и знания, социально-политической лояльности и интеллектуально-эстетической широты жизнеутверждения -

вот те качества, которые могут репрезентировать студента и выпускника Корабелки.

Созревание требуемого образа и соответствующего образа жизни наиболее сложная комплексная задача, значимая для управленческих решений как для вектора Абитуриент, так и для векторов Студент и Выпускник. Именно её реализация должна стать основой стратегии деятельности воспитательного сектора университета. *Имеющиеся предпосылки:* наличие военной кафедры, военного центра, действующий госзаказ, стратегическая государственная важность комплексной (техническая и социальная компетентность и личностная зрелость) подготовки кадров для судостроения, наличие в историческом наследии вуза признанных авторитетов. *Основные инструменты:*

- Формирование установки на абсолютный примат здорового образа жизни (дифференцированный и технически оснащенный спортивный сектор, новые формы работы кафедры физвоспитания, открытые спортивные площадки, возможно, использование достаточно обширных, прилегающих к учебному корпусу на Ульяновке и пока не окультуренных территорий для релаксации студентов и преподавателей и показательных спортивных занятий студентов военного центра, использование возможностей собственной шлюпочной базы и базы отдыха и т. п.).
- Целесообразной приоритет эффективной и результативной учебно-научной деятельности.
- Создание многоуровневой мотивационной среды для научно-технического творчества и инновационного мышления студентов.
- Раннее знакомство студентов со всеми ключевыми сферами судпрома: от конструкторского бюро до верфи.
- Формирование корпоративной ценностной идеологии и идеологической символики [2, С. 120]

Необходимо также привлекать самих студентов к «пластической хирургии» по созданию требуемого образа. Только при этом условии референтный образ может быть успешно инплантирован в самообраз конкретного студента и обрести статус мотивационного фактора. Так, в ходе опросов студентов была выявлена общая тенденция к перфекционизму и её содержательному фазовому ветвлению: студенты младших курсов свое стремление к саморазвитию связывают по преимуществу со спортом и индивидуализирующим имиджем, старшекурсники же и выпускники — с коммуникативными возможностями, профессиональными занятиями и карьерным ростом. Учебно-воспитательные мероприятия в вузе должны учитывать эти фазы взросления личности и соответствующие им приоритеты. На младших курсах достаточно обеспечить комплексную вовлеченность студентов в учебный процесс и

внеаудиторные мероприятия, а также мотивировать установку на самооценку в соответствии с собственными результатами и достижениями на основании четких, прозрачных и общепризнанных критериев. К старшим же курсам на основе достигнутых результатов - знаний и личностного развития студентов - необходимо обеспечить студентам возможность коммуникативных взаимодействий с внешним профессиональным сообществом в сфере предприятий судпрома. Наличие подобных контактов в современных условиях является ключевым фактором, как это ни парадоксально, успешности самого учебного процесса.

В ходе социологических опросов проявилась основная отличительная особенность современного отечественного студента: он является работающим студентом. Уже на первом курсе наличие трудового опыта на постоянной или временной основе отметили 62 % опрошенных, а к пятому курсу на всех факультетах доля совмещающих учебу и работу почти достигает 100%, тогда как лишь у 12 % работа прямо и у 22 % - косвенно связана с получаемой специальностью. Для остальных же 66 % связь между работой, в область которой по необходимости смещается доминанта активности и фокус самоутверждения личности, и учебой становится проблематичной, уязвимой со стороны случайных индивидуальных факторов и трудно управляемой со стороны университета [1, с. 47 -48].

*Управленческий маневр:* Необходимо преобразовать это обстоятельство из неблагоприятного в позитивный фактор посредством создания условий и организации трудового опыта учащихся в непосредственной взаимосвязи с учебным процессом и в связи с получаемой специальностью. Образование получит практическую модификацию, а студент — возможность усиления учебной и трудовой активности. Управленческое воздействие должно осуществляться как на индивидуальном, так и на организационном уровне. Организационный уровень включает ряд перманентных инициатив по интенсификации взаимодействий с промышленным отраслевым комплексом. Продолжающееся в течение последних нескольких лет открытие базовых кафедр СПбГМТУ на отраслевых предприятиях и учреждениях - лишь одно из возможных направлений деятельности. Другими такими направлениями могут быть: целевой студенческий контракт (неполная трудовая занятость), привлечение студентов к выполнению НИР, с введением обязательной квоты на участие студентов в разработках кафедр, разнообразные практики и стажировки с соответствующими сертификатами, рекомендациями, призовыми стипендиями от работодателей.

Индивидуальный уровень может быть осуществлен посредством введения института наставничества. Функция наставника, преподавателя выпускающей кафедры, - актуализировать индивидуальные способности студента в соот-

ветствии с запросами практического сектора, определить валидную тематику курсовых и аттестационных работ, научных публикаций, выстроить индивидуальную стратегию профессионализации, позиционировать интересы студента внутри университета и в среде предприятий-партнеров. Предполагаемым результатом перечисленных блоков должно стать формирование у студентов профессиональной идентичности, уверенности в себе и в своем профессиональном будущем, формирование у каждого студента значимого социального опыта, информационных и коммуникационных связей в профессиональном сообществе и на рынке труда.

Вектор Выпускник остается мало изученным, методику эмпирического исследования еще предстоит разработать. На данном этапе реализации программы можно изложить лишь основополагающие идеи для разработки такой методики, опираясь на опыт пилотажных социологических интервью с успешными выпускниками СПбГМТУ разных поколений. Кластерная модель экономики предполагает длительное сотрудничество всех заинтересованных звеньев, университеты относятся к ключевым звеньям сети. В судостроительном экономическом кластере СПбГМТУ - безальтернативный интеллектуально-образовательный центр. Для любого успешного выпускника СПбГМТУ, оставшегося в сфере судпрома, Корабелка — это навсегда. Целый ряд производственных и карьерных вопросов будет

вновь и вновь возвращать его к своей альма-матер. От лояльности таких выпускников будет зависеть количество и масштаб соглашений о сотрудничестве, в том числе и в образовательной сфере, поскольку, как было указано выше, производство неизбежно все в большей степени будет становиться элементом образовательного процесса. [2, С.121]

*Управленческий маневр* должен быть направлен на усиление у выпускников чувства сопричастности судьбе университета. В нашей стране отсутствует традиционная для США практика подтверждения дипломов и званий, и у университетов практически нет институционализированных рычагов воздействия на своих выпускников. Инициативы университета в этой сфере могут иметь лишь корпоративный и символический характер, но это не отменяет их действительности, поскольку университет может продолжать значимо влиять на рейтинг и престиж своих выпускников в профессиональном сообществе и в политическом поле: учреждение почетных званий и премий за заслуги перед Корабелкой, квота на преподавание для выдающихся выпускников, членство в ученых советах университета и факультетов. Наличие и образ успешных, лояльных и полезных для университета выпускников послужит окончательной редакцией того референтного образа студента Корабелки, который является центральной управленческой идеей социологического менеджмента.

### Литература

1. Солдатов А.В., Голованова О.В. Социологический портрет современного студента и проблемы его воспитания. Мониторинг и профилактика зависимого, отклоняющегося и противоправного поведения в ходе образовательного процесса. СПб.: СПбГМТУ. 2016. С. 45 - 49.
2. Солдатов А.В., Шевченко М.М., Медведев В.И. Естественнонаучная и гуманитарная среда вуза как фундаментальная основа формирования специалиста будущего. Морской вестник, 2015, №4 (56), С. 120 - 121.

### References

1. Soldatov A.V., Golovanova O.V. Trudy Simpoziuma «Monitoring i profilaktika zavisimogo, otklonyayushchegosya i protivopravnogo povedeniya v hode obrazovatel'nogo processa». «Sociologicheskij portret sovremen-nogo studenta i problemy ego vospitaniya». SPb.: SPbGMTU. 2016. pp. 45 - 49.
2. Soldatov A.V., Shevchenko M.M., Medvedev V.I. (2015) Estestvennonauchnaya i gumanitarnaya sreda vuza kak fundamental'naya osnova formirovaniya specialista budushchego . Morskoy vestnik, №4 (56), 120 - 121.

УДК 338.242

## ИНСТРУМЕНТАРИЙ РЕФЛЕКСИВНОГО АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО СУДОСТРОЕНИЯ

### **Волостных Вадим Викторович**

доктор экономических наук,  
профессор кафедры управления судостроительным производством  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: vadim.volostnykh@mail.ru

### **Иванкович Татьяна Степановна**

кандидат экономических наук,  
доцент кафедры управления судостроительным производством  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: tatianaivankovich@yandex.ru

### **Иванкович Анна Вадимовна**

кандидат экономических наук,  
начальник бюро финансового контроля, планирования и анализа  
финансового отдела АО «Адмиралтейские верфи»  
190121, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 203  
e-mail: annaviv@yandex.ru

### **Аннотация**

Объект исследования – судостроение СССР/РФ как социально-экономическая система.

Период исследования – 1946-2015 гг.

Цель работы – создание инструментария для рефлексивного анализа как ключевого элемента стратегического управления на отраслевом уровне.

В работе решаются задачи:

выбор и квантификация целевого индикатора результата деятельности отрасли;  
разработка метода приведения продукции отрасли к сопоставимому виду;  
систематизация уникальной информационной базы отечественного судостроения;  
формирование модельной выборки предприятий и продукции;  
построение динамических рядов результатов.

**Ключевые слова:** инструментарий, отрасль, результат производства, рефлексия, сопоставление результатов, стратегический анализ, судостроение.

## REFLECTIVE ANALYSIS IMPLEMENTATION FOR RUSSIAN SHIPBUILDING

### **Volostnykh Vadim Viktorovich**

the professor, Dr. Econ. Sci.  
the professor of SHIPBUILDING MANAGEMENT DEPARTMENT, STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF  
SAINT-PETERSBURG Lotsmanskaya, 3, St.-Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: vadim.volostnykh@mail.ru

### **Ivankovich Tatiana Stepanovna**

Candidate of Econ. Sci.  
associate professor at the Department of SHIPBUILDING MANAGEMENT DEPARTMENT, STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St.-Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: tatianaivankovich@yandex.ru

### **Ivankovich Anna Vadimovna**

Candidate of Econ. Sci.  
chief of the office of financial control, planning and analysis at Financial department ,  
JSC "Admiralty Shipyards"  
Fontanka Riv. Emb., 203, St.-Petersburg 190121,  
Russian Federation  
e-mail: annaviv@yandex.ru



## Abstract

An article is devoted to the new attainment in strategical management practice. The Russian shipbuilding inveterate plight - poor analytical implementation was surmounted by the new tool developed due to new approach and peculiar IT techniques.

In seeking for appropriate instrument authors faced several tasks:

- an objective indicator choice and quantification;
- method elaboration for comparison of ships of different types and sizes;
- voluminous bulk of primary information data collection and systematization;
- model exception from subjects (shipyards) and objects (ships) of industrial production responsive to management change environmental trends;
- forming the dynamic sequences of output indexes, embracing long timescopes.

Nowadays we are provided with the means to reduce the variety of ship classes and dimensions to common quantitative measures as an industrial production objects. It creates an opportunity to put in good order a precious statistic data (embracing 31520 ships on time span from 1946 to 2015). So was formed reliable information base for every branch of strategic management. Especially productive future trends are expected in reflective analysis and forecasting.

**Key words:** analytical implement, industrial dynamics, industrial dynamics, product comparison, product evaluation, reflection, reflective analysis, shipbuilding branch, strategic management.

Часами измеряется время;  
сим последним измеряется вечность;  
чем, скажи, измеришь ты...  
*результат судостроительного производства?*

## Введение

Наблюдаемые в РФ деградация и разрушение инструментов рефлексивного мышления, способности предвидеть состояние и поведение социально-экономических систем и окружающей среды – не следствие, а инструмент генерации кризисных явлений, когда динамика всех процессов резко меняется, возникают разрывы непрерывности функций, стираются как долгосрочная (историческая), так и краткосрочная (оперативная) память. А перманентный кризис - условие сохранения пагубного для страны экономического курса. Недаром премьер Д.А. Медведев принципиально не приемлет рефлексии как способа познания реальности и предвидения будущего, утверждая, что «современное экономическое развитие вообще плохо поддается прогнозированию»<sup>5</sup>...

Рассчитывать на радикальное изменение ситуации в общегосударственном масштабе не приходится даже в случае пересмотра политики правительства, хотя бы из-за размеров массива утраченной памяти и разнообразия институциональных условий. Более реальным видится путь создания локальных (отраслевых) систем рефлексивного анализа с ограниченным набором информационных, методологических и целевых (мотивационных) инструментов.

В частности, в судостроении потребность в таких инструментах обозначилась на фоне:

- безуспешных попыток реформирования системы управления в 1992-2010 гг.;
- недостижения заявленных результатов стратегий, концепций, программ в 2008-2015 годах;
- снижения обучаемости руководителей именно в направлении рефлексивного

анализа (в 2007-16гг. в ОСК сменилось 7 президентов, из которых лишь 1 имел кораблестроительное образование и опыт работы).

Выяснилось, что традиционные методы обоснования важных решений – планирование на основе статистических нормативов посредством прямого счета, математическое моделирование и «экономические эксперименты» не дают полезных результатов в силу как сверхсложности управляемых систем, так и крайней неопределенности. Изучение же дискурса предыдущих состояний системы дает надежду усмотреть наличие самопроизвольных (под влиянием как окружающей среды, так и внутренних закономерностей самой системы) полномасштабных экспериментов, анализ динамики и результатов которых позволит обосновать стратегические решения и предсказать их результаты.

Минимальный пакет требований к инструментарию рефлексивного анализа на локальном, отраслевом уровне может быть сведен к следующему:

- выбор целевого индикатора деятельности системы, его качественная идентификация;
- разработка количественных параметров оценки индикатора, обладающего способностью приводить к сопоставимому виду результаты работы системы, полученные в разное время, в разных регионах и странах, при любых видах продукции и т.п.;
- качество информационной базы (достоверность, точность, своевременность, устойчивость к случайным и преднамеренным искажениям);
- длительность и непрерывность хронорядов, перекрывающих циклы изменения как технологических, так и экономических укладов;
- минимальный объем выборки объектов, характерных для описываемой системы и чувствительных к динамике изменений.

Обязательными предпосылками создания отраслевого инструментарию рефлексивного анализа являются:

<sup>5</sup> Вопросы экономики 2016, № 10

- наличие (сохранение либо воссоздание) информационной базы, отвечающей требованиям полноты, достоверности, сопоставимости и непрерывности;
- продолжительность периода анализа, на протяжении которого протекают циклы наиболее важных динамических изменений;
- методологическая корректность и практическая апробация способа представления результата судостроительного производства, обладающего свойством соизмеримости между классами, типами, размерениями объектов производства; между разновременными наблюдениями; между субъектами производства (предприятиями), между отечественными и зарубежными условиями.

### Информационная база

Информационная база судостроения СССР/РФ уникальна. Она охватывает 47-51 верфь (в т.ч. потерянные с распадом СССР) с общим числом работающих, колеблющимся в пределах 280-85 тыс. чел., в том числе 130-28 тыс. основных производственных рабочих. Достоверный и непрерывный хроноряд по этой устойчивой общности покрывает период с 1946г. по 2015 г. (70 лет), при этом его точность определяется неизменностью (конструктивно-технологической однородностью) как продукции, так и производственных процессов, полностью укладываемых в рамки IV технологического уклада. Из общего объема продукции (31 520 кораблей и судов, в т.ч. 30 900 за 1946-90 г.г. и 620 за 1981 -2015 г.г.) по 24 280 единицам (76,8%) сохраняется поштучный учет со всеми характеристиками в натуральном выражении. Такой информационной базой не располагает ни одна высокотехнологичная, в особенности – оборонная отрасль.

Однако для столь обширной совокупности не удастся применить традиционный статистический метод репрезентативной выборки в силу чрезмерно-го разнообразия объектов.

Решить эту проблему возможно только перейдя от «немецкого» подхода к познанию системы во всем многообразии и взаимосвязи ее элементов, к «англосаксонскому», т.е. глубокого изучения обозримой, но показательной выборки. В качестве элементов таковой выбрано сочетание:

- надводные боевые корабли стандартным водоизмещением свыше 1000 т. (323 ед.);
- подводные лодки (758 ед.);
- морские транспортные суда (891ед.)

В пользу данного выбора говорят следующие соображения:

- ограничение размера - выборки (1972 ед. из общего числа построенных кораблей и судов 31 520 ед.);
- большая конструктивно-технологическая однородность (9 укрупненных классов из 36);
- абсолютная достоверность статистических данных;
- по многим классам судов, не во-

шедшим в выборку, цифры приводятся с оговоркой «около», а объем производства некоторых классов измеряется экзотической мерой: промысловые суда, буксиры - в лошадиных силах; суда технического флота - производительностью м<sup>3</sup>/час; стоечные суда - суммарным водоизмещением, несамоходные суда – суммарной грузоподъемностью и т.д. Только в последние годы к промысловым судам стал применяться общепринятый в мировой практике измеритель – брутто-регистрационный тоннаж, который, однако, по-прежнему не применяется к транспортным судам.

- концентрация строительства выбранных судов и кораблей на 13 верфях из 51.

Именно на этих предприятиях концентрировался основной потенциал 1, 2, 7 ГПУ МСП. Они определяли возможности отрасли (не только технические, но и организационно-экономические); сюда направлялся основной поток инвестиций; здесь сказывались любые вариации в методах управления.

- доля 13 выбранных верфей в общей трудоемкости судостроительной продукции отрасли составляет 65-70%, при этом на них построено 95-96% судов и кораблей выбранных классов.

- специализация на строительстве судов и кораблей, вошедших в представительную выборку, весьма устойчива и колеблется в пределах 68-75%.

- выборка сохраняет свои качества на протяжении всего периода анализа. Расширившись с 1945г. до 1990 г. с 10 до 13 предприятий (за счет ввода в строй новых заводов), она не утратила «модельных качеств», то есть способности демонстрировать влияние методов управления на анализируемый процесс и после потери пяти украинских верфей.

Таким образом, размерность задачи сократилась с  $51 \times 31060 = 1,58 \times 10^6$  до  $13 \times 1972 = 2,56 \times 10^4$ , т.е. уменьшилась на два порядка. При этом существенно улучшилась достоверность исходных данных.

Вторая проблема – выбор периода анализа. В пользу выбора интервала 1946-2015 гг. говорят следующие соображения:

- это максимально возможная длина хронорядов 1945-1990 и 1991-2015, которая сама по себе уточняет количественную оценку трендов;
- в 1945 г. возрождение судостроительного производства началось от нуля и прошло все стадии, интересные с точки зрения настоящего исследования;
- на данном интервале прослеживается в сопоставимом виде влияние всех изменений системы управления.

Остается третья проблема - выбор измерителя результата, обладающего свойством соизмеримости:

- между типами и классами судов и кораблей;
- между разными отрезками времен;

– между предприятиями;  
и, наконец, дающего возможность сопоставления отечественного судостроения с зарубежным.

### Измерение результатов

Описанная выше информационная база содержит небывало полную информацию о результатах деятельности отрасли, трактуемой как производственная система в номинальном выражении, т.е. перечень всех единиц выпущенной продукции с некоторыми характеристиками, достаточными для их идентификации. Однако аналитическая ценность этой информации весьма ограничена ввиду их несопоставимости и трудности агрегирования.

На протяжении XIX – XX веков использовался как натуральный, так и стоимостной подходы к созданию интегрального показателя результатов судостроительного производства.

В странах рыночной экономики стремление независимых хозяйствующих субъектов иметь представление о своей конкурентной позиции побудило Европейскую ассоциацию судостроителей (AWES) разработать метод приведения натуральных измерителей гражданской судостроительной продукции к сопоставимому виду. В качестве критерия сопоставления была выбрана полная трудоемкость судна, а в качестве эталона - универсальное сухогрузное судно дедвейтом 15000т. Выбор научно строгого трудового подхода обеспечил как неоспоримую объективность метода, так и широкий спектр его практических приложений. Количественным сравнимым измерителем гражданской судостроительной продукции был избран условно-натуральный измеритель, который получил обозначение *cgt* – *Compensated Gross Tonn* или компенсированная брутто-регистрационная тонна (компенсированная тонна). Компенсированный тоннаж конкретного *j*-того судна – *cgt<sub>j</sub>* рассчитывается по формуле

$$cgt_i = f_{kd} \times gt_i \quad (1)$$

где

*f* – коэффициент компенсации *i*-ого судна *k*-того класса *d*-ой дедвейтной группы;

*gt<sub>i</sub>* – валовая регистрационная вместимость *i*-того судна, брутто-регистрационных т.

Сбор информации для расчетов коэффициентов компенсации был затруднен тем, что первоначально европейские верфи из соображений коммерческой тайны отказывались сообщать абсолютные значения трудоемкости, ограничиваясь лишь соотношениями. Поэтому в первоначальных редакциях системы значения коэффициентов компенсации существенно меняются от версии к версии (1975, 1983, 1988, 1993, 1998, 2000 гг.) и лишь в последних версиях после укрепления доверия к системе и включения в разработку кроме AWES также и SAJ<sup>6</sup> была достигнута стабильность коэффициентов.

Использование метода компенсированного тоннажа представляется вполне логичным в качестве паллиативного решения при выборе инструмента стратегического анализа в гражданском судостроении, что и обусловило его широкое использование в мировом масштабе. Однако для применения подоб-

ного измерителя в отечественном судостроении предстояло преодолеть ряд серьезных методологических проблем.

Во-первых, за период 1946-1990 гг. доля гражданской продукции составляет не более 35% объема судостроительного производства; при этом доля собственно морских транспортных судов, адекватно отражаемых измерителем *cgt*, составляет лишь 15-25%; лишь в 2005-2010 гг. она кратковременно возросла до 60%.

Во-вторых, на большинстве верфей (дававших порядка 70% продукции, одновременно строились гражданские суда и боевые корабли; таким образом, полноценный анализ с использованием лишь параметра *cgt* был возможен лишь на 4 -5 верфях, полностью специализированных на гражданских морских судах.

В-третьих, дискретный характер нормативных коэффициентов компенсации, приводил к неравномерностям точности пересчета (точность снижается вблизи границ тоннажных групп): например, для танкера дедвейтом 10,999 т коэффициент компенсации *f* = 1,80, а для танкера дедвейтом 11,001 т. он снижается до 0,65 Т.е. разница в 2 тонны дедвейта снижала компенсированный тоннаж с 12.500 *cgt* до 4.600 *cgt*.

Очевидную необходимость придать соотношению брутто-регистрационного и компенсированного тоннажа не дискретный, а функциональный, непрерывный характер следовало решать таким образом, чтобы одновременно обеспечить возможность совмещения полученного результата по гражданским судам с таковым по боевым кораблям.

Эту задачу решили на кафедре УСП уже в 2002-2003 гг., предложив измеритель, получивший название «сглаженный компенсированный тоннаж». Для последующего совмещения с измерителем военной продукции были выбраны зависимость вида

$$Scgt = Egt^\varphi \quad (2)$$

где *Scgt* – т.н. «сглаженный» компенсированный тоннаж.

Параметры *E* и  $\varphi$  определялись обработкой дискретных значений нормативных таблиц редакции 2000 г.

Принцип сглаживания был заимствован рабочей группой по вопросам судостроения при OECD<sup>7</sup>, которая вместо очередного пересмотра таблицы коэффициентов перешла к аналитическим зависимостям вида

$$cgt = A \times gt^\beta \quad (3)$$

где: *cgt*- компенсированный регистрационный тоннаж судна;

*A* - коэффициент, зависящий от типа судна

*gt* - брутто-регистрационный тоннаж судна, БРТ

$\beta$  - показатель степени, зависящий от типа судна

Коэффициенты *A*,  $\beta$  получены Советом по судостроению OECBD в результате обработки статистической информации об объемах производства и трудоемкости продукции основных верфей Европы и Юго-Восточной Азии. Новая методика расчета *cgt* введена AWES с 2007 г., которая вполне применима и в условиях РФ.

<sup>6</sup>Ассоциация судостроителей Японии

<sup>7</sup> OECD – Европейская организация сотрудничества и развития

Коренным образом отличается проблематика анализа объемных показателей военного кораблестроения. С одной стороны, задача облегчается наличием достоверных данных о количестве сданных в каждом календарном году единиц с разбивкой по классам, проектам, и по заводам-строителям. При этом столь же достоверные данные имеются и о некоторых технических характеристиках проектов (преимущественно размерения и нагрузки масс).

Наиболее тесной корреляции с производственными характеристиками надводного корабля следовало бы ожидать от параметра «водоизмещение порожнем», однако он слабо представлен в статистических данных за прошедший период. Поэтому приходится оперировать наиболее распространенной в отечественной и мировой статистике величиной - стандартным водоизмещением

Аналогично для подводных лодок целесообразно принять в качестве счетного параметра надводное водоизмещение.

Попытка создать измеритель приведенного тоннажа вида:

$$D_{np} = C \times D_{cm}^\gamma \quad (4)$$

встречает серьезные затруднения.

Прежде всего необходимо определить и нормировать параметры межклассового и межразмерного приведения  $C$  и  $\gamma$ , рассчитанные как соотношение общественно необходимых трудоемкостей корабля данного класса и размерений с соответствующим показателем эталонного корабля.

В качестве таких эталонов выбраны самые массовые корабли рассматриваемой эпохи.

Для надводных кораблей – эскадренный миноносец проекта 30-бис стандартным водоизмещением 2320 т., размер серии – 80 единиц. Для подводных лодок – лодка проекта 613 надводным водоизмещением 1050 т., размер серии – 215 единиц.

Разработанная авторами на основании этих соображений классификационная таблица включает 9 классов судов и их элементов для каждого из видов производства, что существенно облегчает задачу отыскания корреляционных зависимостей. В то же время количество их сочетаний, достигающее  $10^6 - 10^7$ , вполне достаточно для полной характеристики любого из строящихся кораблей как объекта промышленного производства.

Располагая достаточно достоверными данными о фактических затратах труда на постройку кораблей  $k$ -го класса в  $j$ -м производстве, сравнительно просто можно найти корреляционные зависимости для определения общественно-необходимых затрат труда, имеющие вид:

$$L_{jk} = H_{jk} \sum_{r=1}^R T_{jkr}^{\lambda_{jk}} n_{jkr}^{\mu_{jk}} \quad (5)$$

где  $L_{jk}$  - общественно-необходимые затраты труда на заданную программу постройки кораблей  $k$ -го класса в  $j$ -м производстве;

$H_{jk}$  - коэффициент, характеризующий удельную трудоемкость постройки кораблей  $k$ -го класса в  $j$ -м производстве;

$T_{jkr}$  - числовое значение параметра, определяющие трудоемкость для  $k$ -го класса  $r$ -го типа. Например, в корпусообработывающем производстве – это масса металлического корпуса, фундаментов и под-

креплений; в механомонтажном – мощность силовой установки; в малярно-изоляционном – площадь окрашиваемых и изолируемых поверхностей и т.д.;

$n_{jkr}$  - заданное количество кораблей  $k$ -го класса  $r$ -го типа;

$\mu, \lambda$  - показатели степенной функции, характеризующие зависимость трудоемкости продукции от ее натуральных характеристик.

Однако, ввиду крайне недостоверного учета фактических трудовых затрат по судовым заказам воспользоваться столь простым методом не удается. Приходится ориентироваться на наиболее достоверный измеритель, характеризующий фактические затраты труда на изготовление всей продукции (или, точнее, расход трудовых ресурсов), - среднесписочную численность рабочих в каждом виде производства на протяжении года.

Тогда для определения общественно-необходимых затрат труда нужно решить следующую систему уравнений множественной корреляции:

$$P_{jz} = \sum_{k=1}^K M_{jk} \sum_{r=1}^R T_{jkr}^{\psi_{jk}} n_{jkr}^{\omega_{jk}} \quad (6)$$

где:  $P_{jz}$  - фактическая среднесписочная численность рабочих в  $j$ -м виде производства  $z$ -го завода, занятых в течение года.

Количество уравнений равно числу судостроительных заводов, принятых в расчет. Решив эту систему относительно  $M_{jk}, \psi_{jk}$  и  $\omega_{jk}$ , получим общественно необходимую численность рабочих в  $j$ -ом виде производства.

Структура уравнения (6) не позволяет использовать классические методы многофакторного корреляционно-регрессионного анализа для нахождения параметра  $M_{jk}, \psi_{jk}$  и  $\omega_{jk}$ . Это уравнение является нелинейным в том смысле, что включает искомые параметры нелинейным образом. Оно не может быть приведено к линейному виду путем преобразования параметров или замены переменных. Следовательно, для решения задачи целесообразно применить какой-либо из интерактивных методов.

Из предварительного экономического анализа трудовых затрат в разных видах производства при постройке кораблей различных классов и размеров можно заключить, что значения параметров уравнения лежат в довольно узких интервалах. В виду этого для нахождения параметров  $M_{jk}, \psi_{jk}$  и  $\omega_{jk}$  и был выбран метод покоординатной минимизации – метод координатного релаксационного поиска.

Идея метода заключается в том, что на первом шаге «закрепляются» все неизвестные параметры  $M_{jk}, \psi_{jk}$  и  $\omega_{jk}$ , кроме  $H_{11}$ , и находится минимум суммы квадратов отклонений индексов:

$$\sum_{z=1}^Z (1 - I_q^p)^2 \rightarrow \min \quad (7)$$

При значении  $H_{11}$ , приводящем к минимуму этот критерий, осуществляется переход к следующему неизвестному параметру при закреплённых на неизменном уровне всех остальных параметрах. Такое поочередное «закрепление» и «ослабление» связей производится до последнего неизвестного параметра уравнения.

Итерационный процесс начинается с первоначально заданных на основе предварительного экономического анализа значений  $M_{jk}$ ,  $\Psi_{jk}$  и  $\omega_{jk}$ .

Начиная итерационный процесс с различных начальных условий, можно избежать попадания в локальный экстремум или добиться выхода из него (рис. 1).

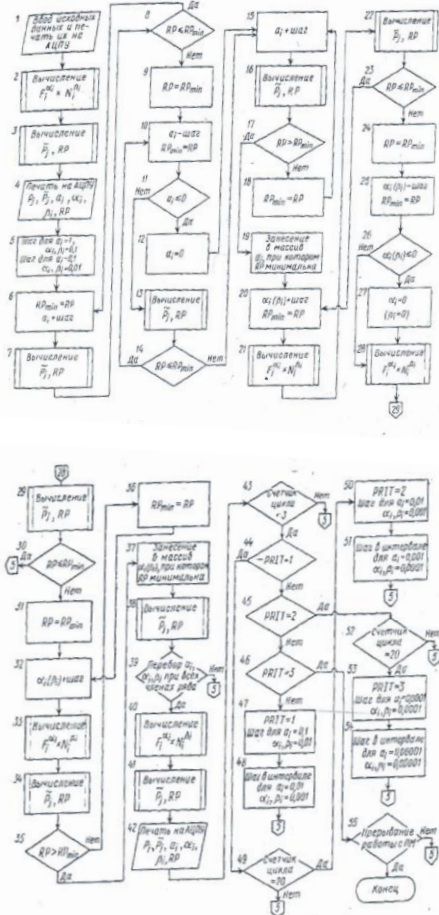


Рис. 1. Блок-схема программы расчета общественно необходимых затрат трудовых ресурсов.

Этот метод поиска экстремума многопараметрической функции был реализован в оригинальной компьютерной программе.

В результате расчета получены значения искомых параметров уравнения и формулы для определения общественно необходимых затрат труда для восьми видов судостроительного производства.

Получив таким образом формулу приведения количества продукции любого вида к выбранному эталону (через равенство общественно необходимых затрат труда) можно ввести условно-натуральный измеритель объема продукции – эквивалентная компенсированная тонна - есгт, который может в анализе, плановых расчетах и прогнозах применяться совместно с сгт.

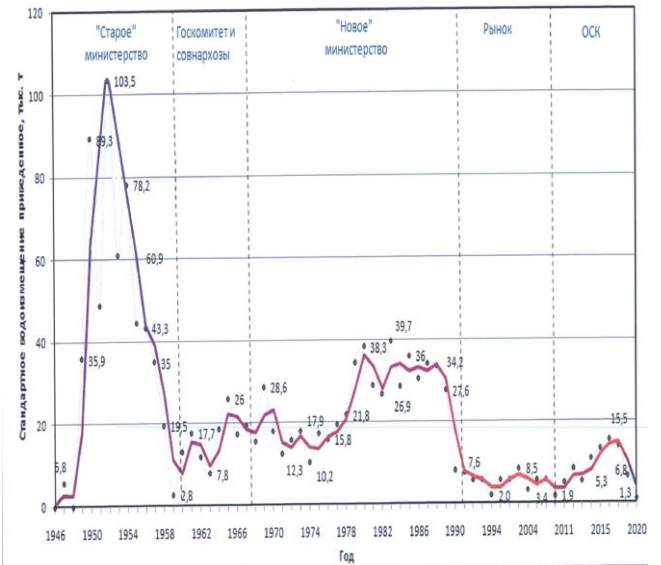


Рис. 2. Динамика строительства надводных кораблей.



Рис. 3. Динамика строительства подводных лодок.

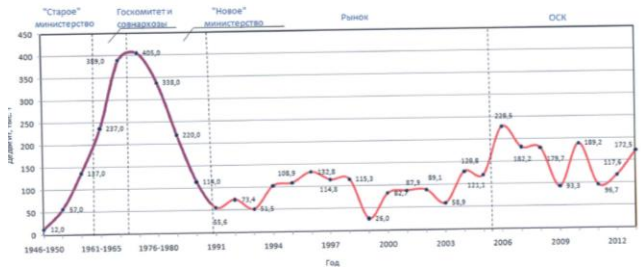


Рис. 4. Динамика строительства транспортных судов.

Одно из возможных применений предложенного методологического инструментария иллюстрируется рис. 2-4, где с применением измерителей сгт и есгт построены динамические ряды производства отдельных классов кораблей и судов, так и возможность интегральной оценки результатов работы отрасли с суммированием значений этих измерителей.

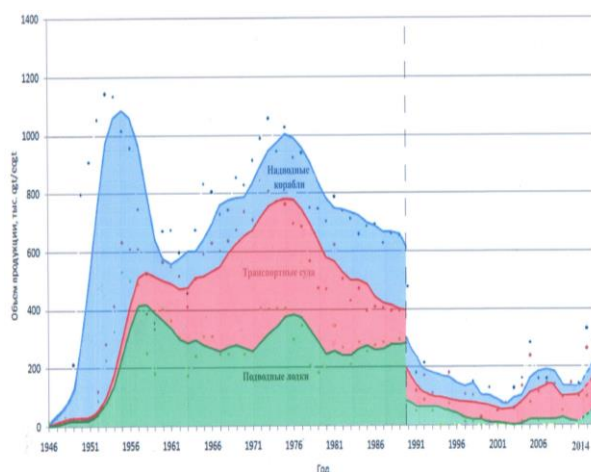


Рис. 5. Динамика судостроения СССР/РФ.

Применение современных ИТ – технологий, естественно, теоретически позволяет решить эту проблему (вплоть до прямого счета по детальным нор-

### Заключение

1. Подтверждено, что судостроительная промышленность СССР/РФ располагает уникальной среди всех высокотехнологичных (в особенности оборонных) отраслей информационной базой, содержащей сведения о постройке кораблей и судов, а также об их технических характеристиках. На этой основе удалось построить полные, непрерывные и достоверные хроноряды за период 1946 – 2015 гг. (в номенклатурном выражении).

2. Для обработки этих рядов предложены, разработаны и апробированы методики приведения характеристик судов и кораблей всех классов и размеров к сопоставимому виду (в условно-натуральном выражении) независимо от изменения институциональных, ценовых, структурных факторов. Применение этой методики позволило получить достоверную картину результатов работы отрасли за 70 лет.

3. Тем самым получен инструментарий, пригодный для использования в практике стратегического управления на отраслевом уровне, в первую очередь – в режиме рефлексивного анализа.

4. Появляется возможность отслеживать колебания результатов судостроительного производства и выяснять влияние на них факторов, периодизировать развитие отрасли, оценивать качество стратегий и доктрин, обнаруживать социальные процессы, а главное – повысить обучаемость управленческой элиты.

5. Новый подход к проблеме и оригинальное программно-математическое обеспечение позволили создать инструмент приведения к сопоставимому виду (в условно-натуральной форме) результатов постройки основных классов кораблей и судов, позволяющий сводить их в интегральный измеритель результата судостроительного производства для уровней от верфи до отрасли.

6. Это поднимает информационную базу отечественного судостроения на качественно высший

уровень и расширяет ее полезность для стратегического управления отраслью.

7. В частности, рефлексия из области туманных суждений становится объектом строгого количественного анализа, что уже приносит отличающиеся существенной новизной результаты (периодизация, позиционирование, причинно-следственные связи и т.д.).

8. Наличие качественно строгого и количественно формализованного целевого индикатора дает возможность отнести рубеж целеполагания в области развития потенциала отрасли за пределы портфеля заказов, то есть увеличить горизонт стратегического планирования на 15-20 лет.

9. В прогнозировании становится возможным оценить как темповую, так и ресурсную границу ожидаемого роста результата, отсеивая заведомо нереалистичные предложения.

10. Появляется объективный критерий оценки результатов предприятий и отрасли в целом, как инструмента мотивации и стимулирования.

Возникает вопрос о необходимости и достаточной точности результатов. Следует принять в расчет следующее соображение: несмотря на разнообразие целевого назначения кораблей и даже конъюнктурное изменение его для целей изменения как стратегических, так и оперативно-тактических доктрин боевые корабли на протяжении 1950 – 2015 г.г. сохраняют уникальную конструктивно-технологическую однородность, и едва ли утратят ее до 2035 г.

### Литература

1. Волостных В.В. Экономическая сущность, критерии и показатели эффективности производства. – Л., ЦНИИ «Румб», 1982.
2. Захаров И.Г. Концептуальный анализ в военном кораблестроении. – СПб., Судостроение, 2001.
3. Иванкович А.В. Стратегические аспекты управления финансовым циклом в системе сбалансированных показателей. – Морской вестник № 1 (57), 2016
4. История отечественного судостроения, ред. Спасский И.Д. – СПб., Судостроение, 1996.
5. Кузин В.П., Никольский В.И. Военно-морской флот СССР 1945-1991. – СПб.: Историческое морское общество, 1996.
6. Логачев С.И., Чугунов В.В., Горин Е.А. Мировое судостроение: современное состояние и перспективы развития. – СПб., МорВест, 2009.
7. Петухов Р.М., Волостных В.В. Управление повышением эффективности производства в отрасли. – М.: Экономика, 1979.
8. Судостроительная промышленность России; отраслевое исследование. М.: INFO Line, 2015.
9. Compensated Gross Tonnage (CGT) Factors: OECD, 1994.
10. Compensated Gross Ton System – revised 1 January 2007 OECD council working party on shipbuilding, 2007.

### References

1. Volostnykh V.V. Ekonomicheskaya suschnost', kriyerii i pokazateli effektivnosti proizvodstva. – L., TSNII "Rumb", 1982.
2. Zakharov I.G. Kontseptualniy analiz v voennom korablestroyenii. – SPb., Sudostroenie, 2001.
3. Ivankovich A.V. Strategicheskie aspekty upravleniya finansovym tsiklom v sisteme sbalansirovannykh pokazateley. – Morskoy vestnik № 1 (57), 2016.
4. Istopria otechestvennogo sudostroenia. Red. Spassky I.D., SPb., Sudostroenie, 1996.
5. Kuzin V.P., Nikolsky V.I. Voенno-morskoy flot SSSR1945-1991. – SPb.: Istoricheskoe morskoe obschestvo, 1996.
6. Logachev S.I., Chugunov V.V., Gorin E.A. Mirovloe sudostroenie: sovremennoe sostoyanie I perspektivy razvitiia. – SPb., Morvest, 2009.
7. Petukhov R.M., Volostnykh V.V. Upravlenie povysheniem effektivnosti proizvodstva v otrasli. – M.:Ekonomika, 1979.
8. Sudostroitel'naya promishlennost Rossii: otraslevoe issledovanie. M.: INFO Line, 2015.
9. Compensated Gross Tonnage (CGT) Factors: OECD, 1994.
10. Compensated Gross Ton System – revised 1 January 2007 OECD council working party on shipbuilding, 2007.

УДК 338.242



## Научный журнал МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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 – инструкция прилагается ниже
3. Одна рецензия на публикуемую статью по соответствующей специальности с подписью, заверенной гербовой печатью. При междисциплинарном исследовании представляются две рецензии от экспертов различных областей наук по соответствующей тематике.
4. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
5. Лицензионный договор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) могут быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу [mit-journal@mail.ru](mailto:mit-journal@mail.ru) (по этому 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. Оригинал акта экспертизы должен быть либо прислан по почте в адрес редакции, либо доставлен 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.

**Журнал публикуется в цветном варианте.**

**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.



УДК 629.12.001.2

## ИНСТРУКЦИЯ ПО ПОДГОТОВКЕ СТАТЕЙ ДЛЯ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

**Никитин Николай Васильевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования судов  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
e-mail: morintex\_spb@mail.ru

### Аннотация

В работе предлагаются правила оформления статей для научного журнала «Морские интеллектуальные технологии» в текстовом процессоре MS Word 97-2003 по требованиям для публикации в научном журнале ВАК, а также международных реферативных баз данных Scopus и Web of Science. Инструкция представляет собой специальную заготовку, которая служит базисом для создания конкретной статьи.

Аннотация предоставляется авторами в расширенном виде. Объем: не менее 950 и не более 1800 знаков (с пробелами), то есть 100-250 слов. В аннотации должны быть четко определены цель работы, ее новизна, представлены основные выводы. Языки – русский и английский.

Типичная структура аннотации: состояние вопроса; материалы и/или методы исследования, результаты; заключение.

Методы в аннотации только называются. Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и выводам, которые, по мнению автора статьи, имеют практическое значение. Следует указать пределы точности и надёжности данных, а также степень их обоснования. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.

**Ключевые слова:** Список ключевых слов должен характеризовать предметную область исследования. Недопустимо использование терминов общего характера (например, проблема, решение), не являющихся специфической характеристикой публикации. Количество ключевых слов должно быть 8-10.

## GUIDELINES FOR PREPARATION OF ARTICLES FOR THE ACADEMIC PERIODICAL «MARINE INTELLIGENCE TECHNOLOGIES»

**Nikitin Nikolay Vasilevich**

the professor, Dr.Sci.Tech.,  
the professor of department of ship design  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: morintex\_spb@mail.ru

### Abstract

The paper suggests rules for formatting articles to be submitted for the "Maritime Smart Technologies" academic periodical in the MS Word Processor 97-2003 according to the requirements set out for publication in an academic periodical of the State Commission for Academic Degrees and Titles as well as in the international Scopus and Web of Science bibliographic databases. The guidelines represent a special template which serves as a basis for creation of a certain article.

The authors should submit an extended abstract. The abstract should contain minimum 950 and maximum 1800 characters (including spaces), i. e. 100–250 words. The abstract must cover the objective and novelty of the paper and reflect the main conclusions. The languages of the abstract should be Russian and English.

The standard structure of an abstract is as follows: the state-of-the-art summary; data for study and/or research techniques; findings; conclusion.

The techniques should only be mentioned in the abstract. The findings should be described as accurately and informatively as possible. The major theoretical and experimental results, actual data, discovered interrelations and common factors should be reflected. Still new results and conclusions which, from the author's point of view, are of practical importance are put above. The data accuracy and reliability limits as well as the degree of their verification should be indicated. The conclusions can be accompanied by recommendations, estimations, suggestions described in the article.

**Key words:** The list of key words must be specific for the subject field of the investigation. General terms (e. g. problem, solution) which are not specific for this publication are inadmissible. The key words should amount to 8–1.

### Введение

При подготовке статей у авторов нередко возникают трудности, связанные с необходимостью жестко выдерживать требуемые форматы подготовки текстов.

Вместе с тем, в современных текстовых процессорах существуют развитые средства поддержки общезначимых и специализированных шаблонов, автоматизирующих эту деятельность. Учитывая вышесказанное, автор данной инструкции подготовил специализированный шаблон создания *camera ready* текстов статей, представляемых в редакцию.

Данная инструкция не обычный текст, а заготовка, которую авторы работ, представляемых в журнал, должны редактировать для получения качественных текстов статей.

**Обращаясь к авторам, редакция журнала доводит до их сведения требования к оформлению статей. Суть их сводится к тому, что, с одной стороны, предоставленная авторами информация должна быть интересной и понятной международному научному сообществу без обращения к полному тексту статьи. а с другой – должны быть обеспечены возможности контекстного поиска и аналитической обработки данных.**

**Фамилии авторов** должны быть транслитерированы, или указаны так же, как в ранее опубликованных в зарубежных журналах статьях. Должны быть представлены адресные сведения о месте работы авторов, должность, ученая степень и ученое звание.

Название организации переводится на английский язык без составных частей названий организаций, обозначающих принадлежность ведомству, форму собственности, статус организации с указанием полного юридического адреса в следующей последовательности: улица, дом, город, индекс, страна. Наиболее полный список названий учреждений и их официальной англоязычной версии можно найти на сайте НЭБ eLibrary.ru. Название статьи, ключевые слова и аннотация также переводятся на английский язык. Все переводы должны быть высококачественными.

**Название статьи** должно быть информативным, можно использовать только общепринятые в международном научном общении сокращения. В переводе названия недопусти-

мы транслитерации с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Англоязычное название должно быть грамотно с точки зрения английского языка, при этом по смыслу полностью соответствовать русскоязычному названию.

Обращаем внимание авторов на необходимость обеспечить высокое профессиональное качество перевода на английский язык. Автоматизированный перевод с помощью программных систем категорически запрещается! При обнаружении экспертом Редакции низкого качества перевода статья отклоняется!

Возможности систем SCOPUS и Web of Science позволяют проводить исследования: по ссылкам, оценивать значение и признание работ конкретных авторов, научный уровень журналов, организаций и стран в целом, определять актуальность научных направлений и проблем, выявлять их точки роста и падения и т.д. Ссылка на публикацию в научной статье является одним из главных показателей качества публикации. А статья с представительным списком литературы демонстрирует профессиональный кругозор и качественный уровень исследований ее авторов

Полный текст должен быть структурированным по разделам. Структура полного текста рукописи, посвященной описанию результатов оригинальных исследований, должна соответствовать общепринятому шаблону и содержать разделы: введение (актуальность), цель и задачи, материалы и методы, результаты, выводы, обсуждение (дискуссия).

### 1. Инсталляция заготовки Mor-Inst

Вы получили по электронной почте (или некоторым другим способом) файл **Mor-Inst.doc** и должны использовать его на своем текстовом процессоре MS Word 97-2003.

Для того, чтобы начать работу необходимо: скопировать на Ваш компьютер файл **Mor-Inst.doc**, переименовав его под фамилией первого автора (например, **nikitin.doc**).

После выполнения этих действий Ваш текстовый процессор MS Word 97-2003 готов для

создания документа в формате samera ready для оформления номера.

## 2. Начало работы с заготовкой Mor-Inst

Итак, предположим, что Вы скопировали заготовку **Mor-Inst.doc** для своего текстового процессора MS Word 97-2003, как это определено в предыдущем разделе данной инструкции.

Теперь, после вызова текстового процессора MS Word 97-2003, из опции основного меню **File (Файл)** выбирайте подопцию **Open (Открыть)**, а на приглашение выбрать файл отметьте **nikitin.doc** и нажмите клавишу **OK**.

После этого Ваш текстовый процессор откроет документ с данной заготовкой, который существенно облегчит Вашу дальнейшую работу.

Дальнейшая подготовка статьи очень похожа на редактирование "чужого" текста и преобразование его к виду, когда он станет Вашим.

В оставшейся части настоящей инструкции последовательно обсуждаются все основные

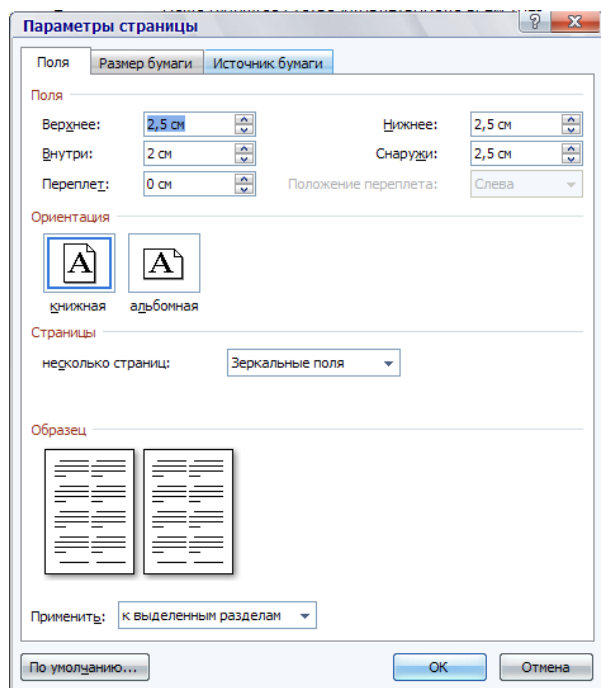


Рис. 1. Общий Layout страницы

Основной текст набирается в 2 колонки, промежуток между колонками 0,7 мм; ширина колонки 7,9 мм.

Нумерация страниц подготавливаемой работы не производится.

Каждая статья должна быть организована следующим образом (данный sampler сам является примером нужной организации текста статьи)

- УДК.
- Заголовков работы.
- Для каждого автора статья:  
**Фамилия Имя Отчество**

ученое звание, ученая степень,

элементы, которые могут потребоваться при подготовке Вашей статьи.

Обратите внимание на то, что сами элементы заготовки уже выбраны таким образом, чтобы Ваша будущая статья удовлетворяла всем требованиям оформления samera ready текстов для публикации в журнале.

## 3. Основные правила подготовки статей на базе шаблона Mor-Inst

### 3.1. Общие замечания по объему и формату статьи

По решению редакции объемы принимаемых к публикации материалов должны отвечать следующим ограничениям

- объем статьи должен быть не более 5 стр.;
- текст доклада должен укладываться в целое число страниц.

Все материалы должны быть сформатированы для последующей печати на стандартных листах формата А4 со следующим Layout (Параметрами страницы) (рис. 1).

должность

Место работы

Адрес работы (или проживания для неработающих)

E-mail

### Все кеглем 9 все в именительном падеже

- Если авторов несколько, их фамилии упорядочиваются по алфавиту.

- Аннотация работы (не менее 950 и не более 1800 знаков (с пробелами), то есть 100-250 слов).

- Ключевые слова (8-10).

- Разделы и подразделы основного текста (нумерация сквозная арабскими цифрами у разделов и номер раздела + нумерация сквозная арабскими цифрами у данного подраздела; номер раздела и номер подраздела отделяются друг от друга точкой; после номера раздела (подраздела) ставится точка, а название раздела (подраздела) начинается с заглавной буквы, после заголовков точка не ставится).

- В конце работы (перед списком литературы) может быть нenumерованный раздел **Благодарности**, где, как правило, указываются спонсоры (например, номер гранта РФФИ) данной работы.

- Список использованных источников, собранных в нenumерованном разделе **Литература** - После списка литературы размещается список литературы в романском алфавите в нenumерованном разделе **References**

- Все заголовки разделов и подразделов центрируются.

- Ссылки на литературу в тексте работы заключаются в квадратные скобки и даются сквозной нумерацией арабскими цифрами.

**Заголовок работы, ФИО, ученое звание, ученая степень, должность, организация, адрес авторов (телефон и электронный адрес, если имеется), аннотация работы и ключевые**

слова публикуются на русском и английском языках.

3.3. Шрифты, используемые при подготовке статьи

Все шрифты, используемые при подготовке статьи, выбираются из набора *Arial*. Если Вы пользуетесь данным sampler'ом, все размеры будут выставлены правильно и Вам останется только следовать им. Если же Вы пользуетесь твердой копией данного sampler'a, то используйте следующие размеры шрифтов:

- для названия статьи *Arial 13 прописной, жирный*;
- для УДК и идентификации автора (ов) статьи *Arial 9 курсив*;
- для адреса (ов) автора (ов) статьи *Arial 11*;
- для аннотации *Arial 9, границы текста +10 мм слева и -10 мм справа*;
- для текста статьи *Arial 9,5, абзацный отступ 5 мм*;
- для списка литературы *Arial 10,5, жирный, по центру, интервал сверху 12 пт, снизу 4 пт, абзацный отступ 0*;
- для заголовков разделов статьи *Arial 10,5, жирный по центру, интервал сверху 12 пт, снизу 4 пт, абзацный отступ 0*;
- для заголовков подразделов статьи *Arial 9,5, курсив по центру, интервал сверху 12 пт, снизу 4 пт, абзацный отступ 0*;
- для подрисовочных подписей *Arial 8,5, курсив, по центру, интервал сверху 4 пт, снизу 9,5 пт, абзацный отступ 0*;
- для подстраничных ссылок *Arial 8,5, абзацный отступ 0,5*.

4.3. Использование графического материала

В работе допускается использование рисунков, схем, экранных форм и др. графических материалов (обратите внимание на то, чтобы рисунки сохранялись как **цветные** или **черно-белые картинки**) как **внедренных объектов**<sup>8</sup>. Каждое графическое изображение должно представлять собой единый, цельный объект.

По возможности используйте для графического материала минимально требуемое разрешение. Это существенно уменьшает объем пересылаемого материала.

Во всех случаях обращайтесь внимание на то, чтобы текстовые подписи на рисунках были набраны с использованием тех же шрифтов, что и основной текст и меньшим размером.

3.2. Использование таблиц

В работе допускается использование таблиц, подготовленных стандартными средствами MS

<sup>8</sup> Статьи с рисунками, нарисованными в тексте документа с помощью панели "Рисование" MS Word 97-2003, рассматриваются редакцией в индивидуальном порядке по согласованию с авторами статей.

Word 97-2003 . В качестве примера ниже дается представление таблицы, подготовленной с помощью этих средств (табл. 1).

Таблица набирается меньшим кеглем.

Слово таблица *Arial 8,5, курсив, вправо, абзацный отступ 0*.

Название таблицы *Arial 8,5, жирный, по центру, интервал снизу 4 пт, абзацный отступ 0*.

Текст в таблице *Arial 8,5*.

Таблица 1

Пример таблицы

N/ N	Колонка-1	Колонка-2	Колонка-3	Колонка-4	Колонка-5
1.	фффф	ыыыы	111	Ммм	ттттт
2.	фффф	ыыыы	111	Ммм	ттттт
3.	фффф	ыыыы	111	Ммм	ттттт
4.	фффф	ыыыы	111	Ммм	ттттт

Перед и после таблицы одна пустая строка основного текста.

**ФОРМУЛЫ И РИСУНКИ НЕ РАЗМЕЩАТЬ В ТАБЛИЦЕ!!!**

3.4. Использование формул

В работе допускается использование формул любой сложности, поддерживаемых компонентой MS Equation.

Если формула появляется в тексте как отдельная строка, она должна быть центрирована и, при необходимости, помечена сквозной нумерацией арабскими цифрами в круглых скобках. Если формула появляется внутри текста, обращайте внимание на размеры используемых шрифтов, чтобы они были «состыкованы» с размерами текста работы.

Ниже приводятся примеры формул в тексте и в отдельной строке.

Данный пример иллюстрирует использование формулы в тексте  $\sum_{n=1}^{n=K} X_n^k \cdot 1,25$ . Здесь при подго-

товке формулы использованы установки шрифтов by default (по умолчанию). По возможности, пользуйтесь этим способом для подготовки не только формул в тексте статьи, но формул в отдельной строке (1).

$$\forall x \in [a, b] F(x) \leq \varpi \quad (1)$$

Все формулы набираются тем же шрифтом, что и основной текст.

**ФОРМУЛЫ НЕ СОХРАНЯТЬ КАК РИСУНОК!!!**

Если же это, по каким-либо причинам неудобно и/или невозможно, воспользуйтесь установками, приведенными на рис. 2.

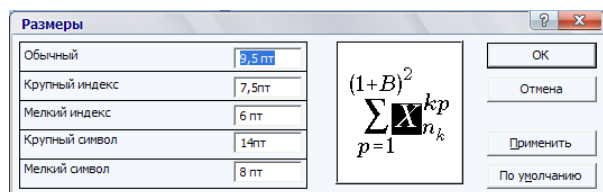
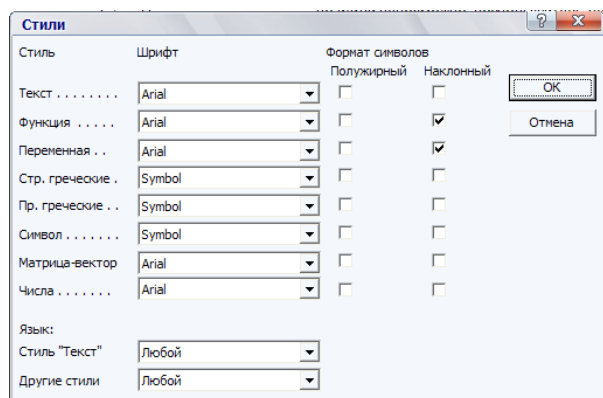


Рис. 2. Установки шрифтов и размеров в MS Equation

Обратите внимание на то, что при наборе формул в тексте, возможно изменение «интервальности». Не бойтесь этого и не пытайтесь уменьшить размер используемого шрифта до нечитаемого уровня. Аналогичное замечание справедливо и для формул, располагаемых в отдельной строке.

### 3.5. Размещение элементов текста на две колонки

Если таблицы, формулы, рисунки превышают размер одной колонки, то их размещают на **полный формат** (на 2 две колонки).

При этом сохраняются все требования по шрифтам и размерам к этим элементам, когда они набраны на формат одной колонки.

Таблица 2

Пример таблицы на полный формат

N/N	Колонка-1	Колонка-2	Колонка-3	Колонка-4	Колонка-5
1.	фффф	ЫЫЫЫ	111	МММ	ТТТТ
2.	фффф	ЫЫЫЫ	111	МММ	ТТТТ
3.	фффф	ЫЫЫЫ	111	МММ	ТТТТ
4.	фффф	ЫЫЫЫ	111	МММ	ТТТТ

Пример формулы на полный формат:

$$N_y(t) = \frac{Eh}{1-\mu^2} \left[ \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{w}{R} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} \right] = \frac{Eh}{1-\mu^2} \xi(t). \tag{2}$$

Пример рисунка на полный формат:

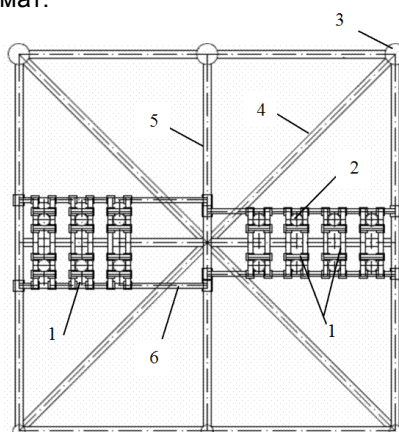


Рис. 3. Раскрепление водоотделяющих колонн с помощью жестких рам (виде плане на диафрагму МСП): 1 – жесткие рамы; 2 – водоотделяющие колонны; 3 – вертикальные стойки опорного блока; 4 – раскосы опорного блока; 5 – распорка опорного блока; 6 – фундамент жесткой рамы

### Заключение

Автор данной инструкции руководствовался единственной целью – уменьшить авторам сложность подготовки статей для журнала.

### Дополнительная информация (на русском, английском или обоих языках)

Информация о спонсорстве. Необходимо указывать источник финансирования как научной работы, так и процесса публикации статьи (фонд, коммерческая или государственная организация и др.). Указывать размер финансирования не требуется.

Благодарности. Авторы могут выразить благодарности людям и организациям, способствовавшим публикации статьи в журнале, но не являющимся её авторами

### Литература

В библиографии (пристатейном списке литературы) каждый источник следует помещать с новой строки под порядковым номером. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТ Р 7.05-2008.

### Литература и References пишутся в одну колонку без переносов

#### References

Список литературы на русском языке **КРОМЕ ТОГО** должен быть представлен и в романском алфавите (латинице), то есть, транслитерирован, (транслитерация – это побуквенная передача текста, написанного с помощью русского алфавита, средствами латинского алфавита), список литературы на других языках должен быть приведен на языке оригинала.

Вся транслитерация списка литературы должна быть выполнена в соответствии с системой Госдепартамента США, которая в настоящее время является наиболее распространенной.

Автоматизировать процесс транслитерации можно, воспользовавшись программным обеспечением, которое доступно по адресу [www.translit.ru](http://www.translit.ru) (в раскрывающемся списке «Варианты» выбираем вариант BGN).

Транслитерированная литература должна быть сформатирована следующим образом.

Структура библиографической ссылки на статью:

**Author, A. A., Author, B. B., & Author, C. C. (2005).**

**Title of article. Title of Journal, 10(2), 49-53.**

#### **Материалы конференций:**

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalin I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Svешnikov A.V. Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi" (Proc. 6th Int. Technol. Symp. "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact"). Moscow, 2007, pp. 267-272.

#### **Книги (монографии, сборники, материалы конференций в целом):**

Belaya kniga po nanotekhnologiyam: issledovaniya v oblasti nanochastits, nanostruktur i nanokompozitov v Rossiiskoi Federatsii (po materialam Pervogo Vserossiiskogo soveshchaniya uchenykh, inzhenerov i proizvoditelei v oblasti nanotekhnologii [White Book in Nanotechnologies: Studies in the Field of Nanoparticles, Nanostructures and Nanocomposites in the Russian Federation: Proceedings of the First All-Russian Conference of Scientists, Engineers

and Manufacturers in the Field of Nanotechnology]. Moscow, LKI, 2007.

Nenashev M.F. Poslednee pravitel'stvo SSSR [Last government of the USSR]. Moscow, Krom Publ., 1993. 221 p.

From disaster to rebirth: the causes and consequences of the destruction of the Soviet Union [Ot katastrofy k vozrozhdeniju: prichiny i posledstvija razrushenija SSSR]. Moscow, HSE Publ., 1999. 381 p.

Kanevskaya R.D. Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov razrabotki mestorozhdenii uglevodorodov (Mathematical modeling of hydrodynamic processes of hydrocarbon deposit development). Izhevsk, 2002. 140 p.

Latyshev, V.N., Tribologiya rezaniya. Kn. 1: Friksionnye

**Ни в одном из зарубежных стандартов на библиографические записи не используются разделительные знаки, применяемые в российском ГОСТе («//» и «-»). Название источника и выходные данные отделяются от авторов и заглавия статьи типом шрифта, чаще всего, курсивом (*italics*), точкой или запятой.**

## Шаблон для сопроводительного письма авторов

В редакцию журнала  
" МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ "  
190008 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д. 3

### СОПРОВОДИТЕЛЬНОЕ ПИСЬМО

Просим опубликовать в журнале " МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ " статью <заголовок статьи>.

Авторами статьи являются <перечень Ф.И.О. авторов полностью>.

Работа выполнена в <полное и сокращенное название учреждения (учреждений)>.

Текущую переписку по вопросам публикации статьи следует вести с <Фамилия И.О.>.

Координаты для обратной связи:

1. Почтовый адрес (с индексом)

2. E-mail

3. Тел. служебный и домашний (с кодом города)

Авторы подтверждают, что статья ранее не была где-либо опубликована, и берут на себя ответственность за возможные нарушения авторских прав третьих лиц.

Материал выверен, цифры, факты, цитаты сверены с первоисточником, материал не содержит сведений ограниченного распространения.

Авторы дают согласие на редактирование статьи, а также на использование её полнотекстовой версии путем размещения на официальном сайте научного журнала "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ" включения в различные базы данных и информационные системы.

Авторы разрешают использовать указанные в статье персональные данные и дают согласие на их опубликование.

Авторы согласны с тем, что редакция имеет право на литературное редактирование и доведение статьи до редакторских стандартов, принятых в рамках журнала.

Авторы разрешают публикацию статьи в открытом доступе на электронных ресурсах в PDF-формате и прилагают лицензионный договор от каждого автора(соавтора) статьи.

Подпись

<Дата>



## Шаблон рецензии

В редакцию журнала  
" МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ "  
190008 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д. 3

### РЕЦЕНЗИЯ

Статья: <Заголовок статьи>.  
Статья:<Фамилии И.О. авторов>

#### I. Информация для редакции

1. Соответствие статьи тематике журнала:
  - статья соответствует тематике журнала (да/нет)
  - если нет, то какие альтернативные журналы могут быть предложены авторам для рассмотрения?
2. Оригинальность и значимость результатов статьи (да/нет/другие оценки):
  - результаты оригинальны
  - результаты имеют научную значимость
  - результаты имеют практическую значимость
3. Качество изложения материала статьи (да/нет/другие оценки):
  - является ли аннотация достаточно информативной
  - понятность изложения статьи
  - следует ли сократить размер статьи
  - ясно ли указана цель статьи
  - адекватно ли определено место статьи в круге других работ
  - можно ли понизить степень подробности математических выкладок
  - адекватен ли список цитированной литературы
  - все ли рисунки и таблицы уместны
  - имеются ли ошибки и технические погрешности
  - строгость изложения математических и экспериментальных результатов
  - достаточно ли обоснованы результаты и выводы статьи
4. Заключение (да/нет)
  - статья может быть принята для публикации без доработки
  - статья требует доработки и повторного рецензирования
  - статья не может быть принята для публикации
  - статью следует передать другому специалисту на рецензирование
5. Замечания и рекомендации по статье для членов редколлегии

Должность, ученое звание и научная степень

<Дата>

<Подпись рецензента>

#### II. Замечания и рекомендации по статье для авторов

Лицензионный договор № \_\_\_\_\_  
г. Санкт-Петербург «\_\_» \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ года

Общество с ограниченной ответственностью «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» (ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»), именуемое в дальнейшем "Лицензиат", в лице заместителя генерального директора-главного редактора научного журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» Никитин Николая Васильевича, действующего на основании Доверенности № 1-59, удостоверенной нотариусом Санкт-Петербурга Володиным А.В. 21.01.2014г, с одной стороны, и **Гражданин РФ** \_\_\_\_\_, именуемый в дальнейшем "**Лицензиар**", с другой стороны, именуемые в дальнейшем "**Сторона/Стороны**", заключили настоящий договор (далее - "**Договор**") о нижеследующем.

#### 1. Предмет Договора

1.1. По настоящему Договору **Лицензиар** на безвозмездной основе предоставляет **Лицензиату** право использования \_\_\_\_\_,

(наименование, характеристика передаваемых материалов)

именуемого в дальнейшем "**Произведение**", на основе неисключительной лицензии в обусловленных Договором пределах и на определенный Договором срок.

1.2. **Лицензиар** гарантирует, что он обладает исключительными авторскими правами на передаваемое **Лицензиату** Произведение.

#### 2. Права и обязанности Сторон

**2.1. Лицензиар предоставляет Лицензиату на весь срок действия исключительных прав на Произведение следующие права:**

2.1.1. право на воспроизведение Произведения (опубликование, обнародование, дублирование, тиражирование или иное размножение Произведения) без ограничения тиража экземпляров. При этом каждый экземпляр Произведения должен содержать имя **автора** Произведения;

2.1.2. право на распространение Произведения любым способом;

2.1.3. право на включение в составное произведение;

2.1.4. право на доведение до всеобщего сведения;

2.1.5. на использование метаданных (название, имя автора (правообладателя), аннотации, библиографические материалы и пр.) Произведений путем распространения и доведения до всеобщего сведения, обработки и систематизации, а также включения в различные базы данных и информационные системы.

2.1.6. право переуступить на договорных условиях частично или полностью полученные по настоящему договору права третьим лицам без выплаты **Лицензиару** вознаграждения.

2.2. **Лицензиар** передает права **Лицензиату** по настоящему Договору на основе неисключительной лицензии.

2.3. **Лицензиар**, в течение трех рабочих дней обязан предоставить **Лицензиату** Произведение в **электронной версии в формате инструкции по подготовке статей для научного журнала «Морские интеллектуальные технологии» (ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»)** для ознакомления. В течение 30 (тридцать) рабочих дней, если **Лицензиатом** не предъявлены к **Лицензиару** требования или претензии, связанные с качеством (содержанием) или объемом предоставленному для ознакомления Произведению, Стороны подписывают Акт приема-передачи Произведения.

2.4. Дата подписания Акта приема-передачи Произведения является моментом передачи **Лицензиату** прав, указанных в настоящем Договоре.

2.5. **Лицензиат** обязуется соблюдать предусмотренные действующим законодательством авторские права, права **Лицензиара**, а также осуществлять их защиту и принимать все возможные меры для предупреждения нарушения авторских прав третьими лицами.

2.6. Территория, на которой допускается использование прав на Произведения, не ограничена.

2.7. **Лицензиар** также предоставляет **Лицензиату** право хранения и обработки следующих своих персональных данных без ограничения по сроку:

- фамилия, имя, отчество;
- дата рождения;
- сведения об образовании;
- сведения о месте работы и занимаемой должности;
- сведения о наличии опубликованных произведений литературы, науки и искусства.

Персональные данные предоставляются для их хранения и обработки в различных базах данных и информационных системах, включения их в аналитические и статистические отчеты, создания обоснованных взаимосвязей объектов произведений науки, литературы и искусства с персональными данными и т.п.

**Лицензиат** имеет право передать указанные данные для обработки и хранения третьим лицам при условии уведомления о таком факте с предоставлением сведений о третьем лице (наименование и адрес) **Лицензиару**.

Отзыв согласия на хранение и обработку персональных данных производится **Лицензиаром** путем направления соответствующего письменного уведомления **Лицензиату**.

### 3. Ответственность Сторон

3.1. **Лицензиар** и **Лицензиат** несут в соответствии с действующим законодательством РФ имущественную и иную юридическую ответственность за неисполнение или ненадлежащее исполнение своих обязательств по настоящему Договору.

3.2. Сторона, ненадлежащим образом исполнившая или не исполнившая свои обязанности по настоящему Договору, обязана возместить убытки, причиненные другой Стороне, включая упущенную выгоду.

### 4. Конфиденциальность

4.1. Условия настоящего Договора и дополнительных соглашений к нему - конфиденциальны и не подлежат разглашению.

### 5. Заключительные положения

5.1. Все споры и разногласия Сторон, вытекающие из условий настоящего Договора, подлежат урегулированию путем переговоров, а в случае их безрезультатности, указанные споры подлежат разрешению в суде в соответствии с действующим законодательством РФ.

5.2. Настоящий Договор вступает в силу с момента подписания обеими Сторонами настоящего Договора и Акта приема-передачи Произведения.

5.3. Настоящий Договор действует до полного выполнения Сторонами своих обязательств по нему.

5.4. Расторжение настоящего Договора возможно в любое время по обоюдному согласию Сторон, с обязательным подписанием Сторонами соответствующего соглашения об этом.

5.5. Расторжение настоящего Договора в одностороннем порядке возможно в случаях, предусмотренных действующим законодательством, либо по решению суда.

5.6. Любые изменения и дополнения к настоящему Договору вступают в силу только в том случае, если они составлены в письменной форме и подписаны обеими Сторонами настоящего Договора.

5.7. Во всем, что не предусмотрено настоящим Договором, Стороны руководствуются нормами действующего законодательства РФ.

5.8. Настоящий Договор составлен в двух экземплярах, имеющих одинаковое содержание и равную юридическую силу, по одному для каждой из Сторон.

**6. Реквизиты Сторон.****Лицензиар:**

ФИО, дата рождения, паспорт, адрес  
регистрации

**Лицензиат:**

ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»  
Адрес: 190121, г. Санкт-Петербург,  
ул. Лоцманская д. 3  
ИНН 7813074883, КПП 783901001  
р/с 40702810255080004491  
Северо-западный банк  
ПАО «Сбербанк России» в Санкт-Петербурге  
БИК 044030653  
к/с 30101810500000000653

**Лицензиар:****Лицензиат**

**Заместитель Генерального директора  
ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»**

\_\_\_\_\_/Никитин Н.В./

АКТ  
к лицензионному договору № \_\_\_\_\_  
г. Санкт-Петербург «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ года

Общество с ограниченной ответственностью «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» (ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»), именуемое в дальнейшем "Лицензиат", в лице заместителя генерального директора-главного редактора научного журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» Никитин Николая Васильевича, действующего на основании Доверенности № 1-59, удостоверенной нотариусом Санкт-Петербурга Володиным А.В. 21.01.2014г, с одной стороны, и **Гражданин РФ** \_\_\_\_\_, именуемый в дальнейшем "Лицензиар", с другой стороны, именуемые в дальнейшем "**Сторона/Стороны**", составили настоящий акт (далее – «Акт») к лицензионному договору № \_\_\_\_\_ от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ года (далее - "**Договор**") о нижеследующем.

1. **Лицензиар** передал, а **Лицензиат** принял в соответствии с условиями Договора 1 (один) экземпляр Произведения - \_\_\_\_\_ (наименование и характеристика) - и право его использования.
2. **Стороны** взаимных претензий по порядку и объему исполнения обязательств по Договору не имеют.
3. Настоящий Акт составлен в двух экземплярах, имеющих равную юридическую силу, по одному для каждой из Сторон.

#### Реквизиты Сторон.

**Лицензиар:**

ФИО, дата рождения, паспорт, адрес регистрации

**Лицензиат:**

ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»  
Адрес: 190121, г. Санкт-Петербург,  
ул. Лоцманская д. 3  
ИНН 7813074883, КПП 783901001  
р/с 40702810255080004491  
Северо-западный банк  
ПАО «Сбербанк России»  
в Санкт-Петербурге  
БИК 044030653  
к/с 30101810500000000653

**Лицензиар:****Лицензиат**

**Заместитель Генерального директора  
ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»**

\_\_\_\_\_/Никитин Н.В./

Правила направления, рецензирования и опубликования  
научных статей в научном журнале «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ»

## **1. Правила направления**

АВТОР (АВТОРЫ) ПОДГОТАВЛИВАЕТ ТЕКСТ РУКОПИСИ НАУЧНОЙ СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ (НАЗВАНИЕ, ДАННЫЕ ПРО АВТОРОВ И КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА И НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ) В ЭЛЕКТРОННОМ ВИДЕ В СООТВЕТСТВИИ С ИНСТРУКЦИЕЙ ПО ПОДГОТОВКЕ СТАТЕЙ ДЛЯ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ".

1.1. АВТОР НАПРАВЛЯЕТ НА ИМЯ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА СОПРОВОДИТЕЛЬНОЕ ПИСЬМО В УСТАНОВЛЕННОЙ ФОРМЕ В СООТВЕТСТВИИ С ИНСТРУКЦИЕЙ ПО ПОДГОТОВКЕ СТАТЕЙ ДЛЯ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ".

1.2. КРОМЕ СТАТЬИ, В РЕДАКЦИЮ В СООТВЕТСТВИИ С ИНСТРУКЦИЕЙ ПО ПОДГОТОВКЕ СТАТЕЙ ДЛЯ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ" ПРЕДОСТАВЛЯЮТСЯ:

- 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.
- Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости).
- Лицензионный договор, распечатанный и подписанный каждым автором.

1.3. В рецензии в свободной форме освещаются следующие вопросы: соответствует ли название статьи ее содержанию, в какой мере статья соответствует современным достижениям в рассматриваемой области научных знаний, удачно ли выбрана форма подачи материала, а также дается описание достоинств и недостатков статьи. В конце рецензии делается заключение о целесообразности публикации рецензируемого материала. В рецензии обязательно указывается Ф.И.О., должность, ученая степень рецензента, дата. Рецензия должна быть заверена подписью рецензента и печатью организации.

Первоначальный вариант статьи, а также предоставленные рецензии хранятся в архиве редакции не менее года (как официальные документы).

1.4. Лицензионный договор в соответствии с Инструкцией по подготовке статей для научного журнала "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ" предоставляется в редакцию в распечатанном виде на бумажном носителе или в отсканированном виде. Он должен быть собственноручно подписан автором (соавторами) шариковой ручкой с синими чернилами.

1.5. Авторы предоставляют статьи и все сопроводительные документы в электронном виде и/или лично, либо по почте заказным письмом по адресу:

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

Редакция научного журнала "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

1.6. 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.

В журнале печатаются материалы, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях. Авторы статей несут ответственность за содержание статей и за сам факт их публикации. Редакция не всегда разделяет мнение авторов и не несет ответственности за недостоверность публикуемых данных.

1.7. Гонорар авторам не выплачивается. С аспирантов плата за публикацию статей не взимается.

1.8. Рукописи авторам не возвращаются.

1.9. Издание осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, соответствующих ее тематике, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. Рецензии хранятся в издательстве и в редакции издания в течение 5 лет.

1.10. Редакция издания направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса.

## *2. Правила рецензирования*

**2.1. При поступлении статьи в редакцию научной периодики, редактором издания производится оценка ее соответствия требованиям к оформлению рукописи, а также правилам предоставления рукописей.** При нарушении правил предоставления рукописей статья отправляется автору на доработку. Рукописи, поступающие для опубликования в журнале, проверяются на соответствие техническим требованиям и профилю журнала. Материалы, не отвечающие этим условиям, возвращаются авторам с указанием причин отказа в приеме.

2.2. Поступающие от авторов научные статьи проходят редакционную научную экспертизу, определяющую их соответствие заявленной проблематике, уровень раскрытия темы, научную новизну.

Целью научной экспертизы, осуществляемой редколлегией научного журнала "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ", является содержательная экспертная оценка качества научной статьи по следующим обязательным критериям научности:

- соответствие названия статьи ее содержанию;
- формулировка решаемой проблемы или задачи;
- обоснование актуальности представленных материалов;
- исследовательский характер статьи;
- аргументированность изложения и выводов, в частности, наличие ссылок на использованную литературу и другие информационные источники;
- научная новизна и практическая значимость полученных результатов;

- наличие выводов по результатам статьи;
- наличие списка литературы со ссылками на источники из него из текста статьи.
- **Определение соответствия содержания статьи тематике журнала.** Если содержание статьи не соответствует тематике издания, она снимается с рассмотрения, об этом сообщается авторам. Материалы авторам не возвращаются.

Экспертизу осуществляют члены редколлегии научного журнала "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ", являющиеся специалистами в соответствующих областях знаний.

2.3. В случае выявления несоответствия предоставленных материалов вышеприведенным критериям, научные редакторы передают рукопись главному редактору для вынесения решения о рекомендации доработки статьи либо ее отклонении от публикации.

Если статья нуждается в доработке, то высылается отзыв члена редакционной коллегии с замечаниями. После исправления автор высылает в редакцию статью повторно. Возвращение рукописи на доработку не означает, что статья принята к печати.

Доработанный вариант необходимо прислать в редакцию повторно, отдельно приложив письмо с ответами на замечания члена редакционной коллегии. Датой поступления статьи считается время поступления в редакцию окончательного (переработанного) варианта.

2.4. Статьи, принятые редакцией научных журналов, распределяются по рубрикам, соответствующим научными направлениями, по которым специализируется журнал.

### ***3. Правила опубликования научных статей, аннотаций и ключевых слов***

3.1. Принятые к публикации статьи проходят редактирование, предусматривающее предпечатную подготовку статьи к размещению в очередном номере журнала.

3.3. Тиражирование журнала производит издательско-полиграфический центр НИЦ «МОРИНТЕХ» в строгом соответствии с периодичностью выхода в свет издания.

3.4. Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

Главный редактор научного журнала

«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Н.В. НИКИТИН



**Есть на складе издательства****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**

**Коршунов Ю. Л.****Люди, корабли, оружие (К 70-летию 1-го ЦНИИ МО РФ)****СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 176 стр.**

Книга содержит историю научно-исследовательских институтов кораблестроения и морского оружия. Автор приводит большое количество фактов, характеризующих деятельность институтов на различных этапах развития флота.

Есть в продаже: **цена 280 руб. + пересылка**

**Архипов А. В., Рыбников Н. И.****Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов****СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.**

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

**Караев Р. Н., Разуваев В. Н., Фрумен А. И.****Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений.****Учебник для вузов****СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.**

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

**Шауб П. А.****Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения****СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.**

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

**Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей****СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.**

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

**Гайкович А. И.****Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2****СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014**

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**



*Российская Академия Наук*

**XXVII International Conference  
«Mathematical and Computer  
Simulation in Mechanics of Solids and  
Structures» MCM 2017  
September 25-27, 2017, St. Petersburg, Russia**



## **Scope**

The conference is primarily aimed at modern simulation methods and techniques in mechanics of solid, liquid and gaseous state.

## **Topics (not limited to)**

- Numerical Methods for problems of structural and continuum mechanics (science, practice and education)
- Dynamic and strength of materials and constructions
- Problems of fluid aero elasticity
- Dynamic and static problems of stability theory
- Mechanics of viscous elasto-plasticity, damage and fracture of materials and constructions
- Mechanics of composites
- Nanomechanics and problems of increasing the strength of materials
- Computer technologies and software for structural modeling
- Fluid and gas mechanics

**ESIS TC5 - *Dynamic of fracture and structural transformation*** is organizing the conference under the auspices of ESIS

**Scientific committee**

**Co-Chairmen:**

Prof. Yuri Petrov (Saint-Petersburg State University, Russia)

Prof. Vadim Silberschmidt (Loughborough University, UK)

**Members :**

Prof. Nikita Morozov (Saint-Petersburg University, Russia)

Prof. Bhushan Karihaloo (Cardiff University, UK)

Prof. Alexander Belyaev (IPME RAS, Russia)

**Local Organizing committee**

Prof. Yuri Rutman (Saint-Petersburg State University for Building and Architecture)

Prof. Svetlana Atroshenko (IPME RAS)

Prof. Vladimir Smirnov (Saint-Petersburg State Transport University)

## **Important dates**

Registration	XX Apr 2017
Abstract submission	XX May 2017
Paper submission	XX July 2017
Conference	25-27 Sept 2017

## **Additional Information**

Conference web site will be available  
starting from September 2016

Any questions and additional information  
requests should be forwarded to

Prof. Vladimir Smirnov  
[bemfemspb@gmail.com](mailto:bemfemspb@gmail.com)