

# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

1001101001101111001010011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010001010101  
00110101101100111000100111001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010  
10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110  
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100  
0011010100110100100001011010010101000100100001111100110011001101101011001110000001110010100101  
11011100110010101111001010101001010011100010110010100110010101111001010111100101101001010  
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001  
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100  
00101001110011010011110001010010101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010

№ 2 (36) Т.1 2017



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



# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 2 (36) Т.1 2017 [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., генеральный директор, 51 ЦКТИ судоремонта

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

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

К.В. Рождественский, д.т.н., профессор, проректор по международному сотрудничеству, СПбГМТУ

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

## Редакционная коллегия

### Заместители главного редактора

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

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

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

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

### Члены Редколлегии

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

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

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

Ю.А. Власов, к.ф.-м.н. преподаватель, Флоридский Международный Университет, Майами, США

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

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

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

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

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

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

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

**Периодичность издания** — 4 номера в год

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

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

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

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

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

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

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

**Телефон/факс +7 (812) 513-04-51**

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

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

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

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

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

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

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

Дизайн: А.В. Антонов



# MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 2 (36) V. 1 2017 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"

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

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

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

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

Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland

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

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

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

## Editorial Staff

### Deputy Chief Editors

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

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

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

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

### Members of Editorial Staff

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

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  
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

стр.

О журнале ..... 9

**КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ**

**Алешин И. В., Гончаров В. К., Зуева Е. С., Портной А. С..** Безопасность морских технологий: Обеспечение экологической безопасности морских технологий ..... 11

**ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА**

**Бесядовский А. Р., Цао Ян** Исследование компоновки экраноплана ..... 17

**Идрисова С.** Использование метода конечных элементов при проектировании морских инженерных сооружений ..... 23

**Ильменков С. Л., Клещев А. А., Ключина К. А.** Применение потенциалов Дебая и «типа Дебая» для вычислений фазовых скоростей трехмерных изгибных волн в различных телах .... 28

**Подольский М. Е., Черенкова С. В., Иванова М. А.** О кориолисовых эффектах во вращающихся потоках жидкостей ..... 35

**Семенова В. Ю., Аунг Мьо Тхант** Исследование влияния изменения расстояния между судами на значения ускорения, возникающих при совместной качке на регулярном волнении в условиях мелководья ..... 44

**Семенова В.Ю., Киав Тхура** Определение нелинейных сил второго порядка, обусловленных суммой частот, возникающих при поперечно-горизонтальных, вертикальных, бортовых колебаниях контура на бихроматическом волнении ..... 53

**Шевчук И. В.** Исследование нестационарных гидродинамических эффектов в кормовой оконечности судна на мелководье ..... 63

**Ткаченко И. В., Чепурко С. И.** Моделирование кавитации в пакете OPENFOAM ..... 69

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

**Васильева Н. В., Григорьев-Голубев В. В., Евграфова И. В.** О повышении эффективности программного обеспечения для электронного (E – learning) и мобильного (M – learning) обучения ..... 75

**Островская Н. В., Рутман Ю. Л., Меньшикова М. В.** Использование структурных моделей для интерпретации феномена повышения прочности образцов при изгибе по сравнению с растяжением ..... 81

**Воропаев А. О., Воропаева М. В., Куракин А. И., Ли Д. С., Мурзин В. В.** Микропроцессорное управление электромагнитным воздействием на металл сварочной ванны ..... 87

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

**Медведев В. В., Лакиза М. В.** Оценка влияния интенсификации в трубном пространстве гофрированными ленточными вставками с надрезами на риск загрязнения поверхностей теплообмена ..... 92

**Медведев В.В., Лакиза М.В.** Расчётное исследование влияния интенсификации теплообмена ленточными вставками с надрезами на работу судовых охладителей ..... 99

**УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

**Сиек Ю. Л., Хуторная Е. В.** Информационная модель бесплатформенной инерциальной навигационной системы подводного робота ..... 105

**УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**Волостных В. В., Иванкович А. В.** Аналитический обзор механизмов управления судостроением .... 112

**ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ**

<b>Золотаревич В. П., Никущенко Д. В., Салиенко А. Е., Фрумен А. И., Югов Н. В.</b> Сравнительный анализ численных решений в совместном методе конечных и граничных элементов с экспериментальными данными для гидромашин и некоторыми аналитическими приближениями .....	119
<b>Золотаревич В. П., Салиенко А. Е., Фрумен А. И., Югов Н. В.</b> Применение совместного метода конечных и граничных элементов в прямой импедансной постановке к исследованию резонансных характеристик инженерных конструкций .....	129
<b>Золотаревич В. П., Салиенко А. Е., Фрумен А. И., Югов Н. В.</b> Характерные особенности применения совместного метода конечных и граничных элементов к исследованию резонансных характеристик лопастных гидромашин .....	137

CONTENTS

page

About journal ..... 9

**SHIP BUILDING**

**Aleshin I. V., Goncharov V. K., Zueva E.S., Portnoy A. S.** Safety of marine technologies. Marine environment protection ..... 11

**THEORY OF SHIP AND STRUCTURES**

**Besyadovskiy A. R., Cao Yang** Wig craft with the slotted wing. Aerodynamics features ..... 17

**Idrissova S.** The applying of finite elements method for designing of marine engineering facilities ..... 23

**Ilmenkov S. L., Kleshchev A. A., Klyubina K. A.** The application of the Debye potentials for calculations of the phase velocities of the three dimensional bending waves in different solids ..... 28

**Podolsky M. E., Cherenkova S. V., Ivanova M. A.** On coriolis effects in rotating flows of liquids ..... 35

**Semenova V. Yu., Aung Myo Thant** Study of the influence of the variation of distance between the ships on the acceleration values during their coupled motions on the regular waves in the shallow water ..... 44

**Semenova V.Yu., Kiav Tkhura** The determination of nonlinear forces of the second order due to the sum of frequencies during the sway, heave and roll of a two-dimensional body on the bichromatic waves ..... 53

**Shevchuk I. V.** Study of unsteady hydrodynamic effects in the stern area of river cruisers in shallow water ..... 63

**Tkachenko I. V., Chepurko S. I.** Cavitation modelling in OPENFOAM ..... 69

**SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION**

**Vasileva N. V., Grigorev-Golubev V. V., Evgrafova I. V.** On improving the effectiveness of software for electronic (E – learning) and mobile (M – learning) training ..... 75

**Ostrovskaya N. V., Rutman Ju. L. Menshikova M. V.** Use of structural models for interpretation of the increase phenomenon in durability of samples at the bend in comparison with stretching ..... 81

**Kurakin A. I., Li Dmitry S. Murzin V. V., Voropaev A. O. Voropayeva M. V.** Microprocessor control of the electromagnetic influence on the metal of the weld ..... 87

**SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)**

**Medvedev V. V., Lakiza M. V.** Assessment of the impact of intensification in the tube space of the corrugated tape inserts with notches on the risk of heat exchange surfaces ..... 92

**Medvedev V.V., Lakiza M.V.** Numerical investigation of influence of intensification malloob-man band inserts notches on the job of marine coolers ..... 99

**CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION**

**Siek Yu. L., Khutornaia E. V.** Information model of strapdown inertial navigation system for underwater robot ..... 105

**CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS**

**Volostnykh V. V., Ivankovich A. V.** Analytical review of governance arrangement in shipbuilding ..... 112

**NUMERICAL PROCEDURES AND SOFTWARE SYSTEMS**

**Zolotarevich V. P., Nikushchenko D. V., Salienko A.E., Frumen A.I., Nicolay V. Yugov N.V.** Comparative analysis of numerical solutions to the coupled boundary and finite elements method with experimental data for hydraulic machines and some of the analytical approximations ..... 119

**Zolotarevich V. P., Salienko A.E., Frumen A.I., Nicolay V. Yugov N.V.** Use of the copled finite and boundary elements method in direct impedance formulation to the study of the resonant characteristics ..... 129



of engineering constructions .....

**Zolotarevich V. P., Salienko A.E., Frumen A.I., Nicolay V. Yugov N.V.** Characteristic features using of the coupled boundary and finite elements method to study the resonance characteristics of the hydraulic machines ..... 137

## 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.**

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

### Basic Magazine Trends

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

**КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ**

УДК 629.12.001.2

**БЕЗОПАСНОСТЬ МОРСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ: ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МОРСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ****Алешин Игорь Владимирович**

доктор технических наук, профессор,  
профессор Кафедры океанотехники и морских технологий  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: aleshin-igor@mail.ru

**Гончаров Вадим Константинович**

доктор технических наук, профессор,  
профессор Кафедры океанотехники и морских технологий  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: vkgonch@mail.ru

**Зуева Екатерина Сергеевна**

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

**Портной Алексей Семёнович**

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

**Аннотация**

В работе приведены результаты анализа современных проблем обеспечения безопасности морских технологий, используемых для изучения, освоения и хозяйственного использования Мирового океана, в том числе в его арктических регионах. Рассмотрены актуальные концепции обеспечения экологической безопасности: концепция нулевого риска и концепция приемлемого риска. На системном уровне рассмотрены основы стратегии обеспечения экологической безопасности морской среды в Российской Федерации. Основное внимание уделено экологической безопасности окружающей среды в местах функционирования морских нефтегазовых комплексов. Отмечена необходимость системного анализа воздействия опасных факторов. В качестве количественной меры оценки безопасности используется понятие риска. Представлена классификация рисков применительно к обеспечению экологической безопасности объектов океанотехники. В качестве базового подхода к обеспечению безопасности используется современная концепция приемлемого риска.

**Ключевые слова:** морские технологии, безопасность, риск, концепция приемлемого риска, защита окружающей среды, недропользование.

**SAFETY OF MARINE TECHNOLOGIES.  
MARINE ENVIRONMENT PROTECTION****Aleshin Igor Vladimirovich**

Professor, Dr. of Eng., Professor of Department of ocean technics and marine technologies,  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation

e-mail: aleshin-igor@mail.ru

**Goncharov Vadim Konstantinovich**

Professor, Dr. of Eng., Professor of Department of ocean technics and marine technologies,  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: vkgonch@mail.ru

**Zueva Ekaterina Sergeevna**

PhD student of Department of ocean technics and marine technologies,  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: zueva\_ekaterina\_smtu@mail.ru

**Portnoy Aleksey Semenovich**

Assistant professor, PhD of Eng., Professor of Department of ocean technics and marine technologies,  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: port\_ocean@mail.ru

### Abstract

In this work the results of the analysis of modern problems of a safety of the sea technologies used for studying, development and economic use of World ocean, including in its Arctic regions are given. The actual concepts of ensuring environmental safety, namely the concept of zero risk and the concept of acceptable risk, are considered. The fundamentals of the strategy for ensuring environmental safety of the marine environment in the Russian Federation are analyzed at system level. The basic attention is given to ecological safety of an environment in places of functioning of sea oil and gas complexes. The need for a systematic analysis of impact of hazards is shown. The concept of risk is used as a quantitative measure of the safety assessment. The environmental risk classification with regards to ocean energy technologies is given. The modern concept of acceptable risk is used as the base approach to a safety.

**Key words:** sea technologies, safety, concept of risk, the concept of acceptable risk, sea bowels using, protection of an environment.

### Введение

Бурное развитие техносферы во второй половине XX и в начале XXI веков сопровождалось широкомасштабным возрастанием негативного антропогенного воздействия на биосферу нашей планеты. В настоящее время именно такое воздействие во многих случаях определяет экологическое состояние окружающей среды, реальные условия жизни человека и благополучие других живых организмов биосферы. Необходимость обеспечения нормальных условий жизни всё возрастающего народонаселения нашей планеты (которое к концу текущего столетия может достигнуть 10 млрд. человек) стимулирует дальнейшее экстенсивное развитие техносферы при условии, что необходимые для этого природные и материальные ресурсы окружающей среды остаются ограниченными, а антропогенная нагрузка на природные экосистемы продолжает возрастать. Сохранение устойчивого развития цивилизации в этом случае возможно только при достижении компромисса между экономикой и экологией, обеспечивающего, с одной стороны, оптимальное решение насущных социально экономи-

ческих проблем, а с другой стороны – сохранение окружающей среды в виде, пригодном для существования нынешнего и будущего поколений людей и всей биосферы в целом [1-3].

В полной мере всё сказанное относится к Мировому океану, как самой большей части биосферы нашей планеты, играющей всё возрастающую роль в обеспечении населения нашей планеты биологическими и минеральными ресурсами. В то же время, морская среда в силу своей высокой подвижности, динамичности, лёгкости перераспределения в ней на большие расстояния и накопления загрязнений, оказывается и наиболее уязвимой к негативному антропогенному воздействию. Поэтому проблема обеспечения безопасности окружающей среды при внедрении современных морских технологий изучения Мирового океана, освоения его природных ресурсов и хозяйственного использования приобретает всё более важное значение для обеспечения устойчивого развития.

Практически все морские работы, как разновидности опасной техногенной деятельности, могут представлять собой угрозу для состояния

окружающей среды и здоровья человека, в том числе:

1. транспортное судоходство (особенно в ледовых условиях);
2. промышленное рыболовство и добыча морепродуктов;
3. океанотехника, (включая строительство и обслуживание потовых сооружений, дамб, создание искусственных островов, прокладка морских трубопроводов и т.д.);
4. добыча полезных ископаемых (прежде всего нефти и природного газа, а также общераспространенных стройматериалов – песка, гальки, и т.д.) на морском дне, их хранение и транспортировка к местам потребления;
5. создание и обслуживание инфраструктуры прибрежной зоны океана (прежде всего вблизи приморских мегаполисов);
6. морские научные исследования;
7. аварийно-спасательные работы;
8. захоронение в море отходов и т.д.

В данной работе предлагается проанализировать некоторые из таких угроз в рамках научно-исследовательских работ, ведущихся на Кафедре океанотехники и морских технологий Факультета кораблестроения и океанотехники Санкт-Петербургского государственного морского технического университета.

### 1. Опасность и безопасность

В последние десятилетия основная угроза для комфортного существования человека и благополучия других организмов биосферы начинает всё в большей степени исходить от неблагоприятного состояния окружающей среды. Биосфера и её составные части имеют определенные пределы саморегуляции и самовосстановления – при превышении которых в результате воздействия негативной антропогенной нагрузки наступает необратимая деградация природных экосистем, а значит и гибель всего живого, в том числе и человечества.

Безопасность в самом общем смысле – это состояние защищенности отдельных лиц, общества, государства и природной среды от внутренних и внешних угроз. Безопасность является важнейшей потребностью человека наряду с его физиологическими, социальными и духовными потребностями.

Основным критерием безопасности является чувство опасности, то есть способности определять социальные, техногенные и природные явления, которые могут нанести ущерб человеку и окружающей среде в настоящем и будущем.

Если соединить понятия опасности, безопасности и необходимости достижения устойчивого развития, то под экологической безопасностью среды следует понимать достижение условий и уровня сбалансированного сосуществования природных экосистем и антропогенной деятельности, когда уровень негативной нагрузки на

окружающую среду не превышает её способности к самоочищению и самовосстановлению [1-3].

Субъектами безопасности являются: личность, общество, государство, биосфера.

Объекты безопасности – это жизненно важные интересы субъектов безопасности (включая права, материальные и духовные потребности личности), а также биосфера, как одна из важнейших составляющих материальной основы государственного и общественного развития.

Для обеспечения устойчивого развития безопасность окружающей среды должна быть обеспечена на нескольких уровнях, включая глобальный (в масштабах всей планеты); национальный (в национальных государствах); региональный (в пределах значительной части национального государства); локальный (в месте нахождения конкретного индивидуума);

Любой объект безопасности на каждом из этих уровней подвергается различным угрозам, в том числе экологическим.

Экологические угрозы – это прогнозируемые последствия или потенциальные сценарии развития событий катастрофического характера, которые обусловлены изменениями состояния окружающей среды и способны нанести вред жизненно важным интересам субъектов безопасности. Фактически управление экологической безопасностью в Российской Федерации сводится к достижению компромисса между экологией и экономикой, базирующегося на государственном регулировании качества окружающей среды, обеспечивающего, с одной стороны, необходимый уровень экономической эффективности производства, а с другой стороны – сохранение окружающей среды в виде, пригодном для нормального существования человека и сохранения функциональной целостности природных экосистем.

### 2. Основные современные концепции обеспечения экологической безопасности

Для качественной оценки уровня экологической безопасности в РФ обычно используются показатели, характеризующие здоровье человека и состояние окружающей среды [1-3].

В частности, здоровье – это состояние полного физического, психического и социального благополучия человека, а не просто отсутствие у него заболеваний.

Главным показателем здоровья, в первую очередь, считается средняя ожидаемая продолжительность жизни, которая в различных странах зависит не только от уровня развития медицины, но и от уровня социально-экономического развития общества и состояния природной среды.

Так как целью безопасности является не только защита здоровья населения, но и защита всей окружающей природной среды, то необходимо определить показатели, которые позволяют оценить ее состояние и качество. К таким показателям относят степень близости состояния природной экосистемы к границе ее устойчивости.

Для оценки такой устойчивости пользуются следующими градациями показателей самовосстановления природных экосистем [6]:

1. *естественное состояние* – когда наблюдается лишь фоновое антропогенное воздействие;
2. *равновесное состояние* – имеет место умеренное антропогенное воздействие, но при этом скорость восстановительных процессов выше или равна темпу нарушения;
3. *кризисное состояние* – антропогенные нарушения в морской среде превышают по скорости естественно восстановительные процессы, но тем не менее, сохраняется естественный характер экосистем;
4. *критическое состояние* – под антропогенным воздействием происходит обратимая замена продуктивных систем на малопродуктивные;
5. *катастрофическое состояние* – трудно обратимый процесс закрепления малопродуктивной экосистемы ;
6. *состояние коллапса* – необратимая утеря биологической продуктивности, полная деградация природных экосистем,

Если говорить о главной экологической опасности для Мирового океана, то это – прогрессирующее антропогенное загрязнение морской среды. Наиболее распространенной её разновидностью в настоящее время является загрязнение моря нефтью и нефтепродуктами, а также промышленными и коммунально-бытовыми стоками [1-3]. Полностью исключить попадание этих субстанций в морскую среду в настоящее время не представляется возможным. В частности, морская добыча ископаемых энергоресурсов (нефти и природного газа) растет, но одновременно увеличивается и негативное воздействие на окружающую среду процессов добычи, хранения, транспортировки, переработки и использования ископаемых углеводородов.

### 3. Количественная оценка уровня экологической безопасности

В качестве количественной меры опасности и безопасности настоящее время широко используют понятие риска [1-3].

Математически суммарный риск  $R$  от нескольких независимых, одновременно происходящих неблагоприятных природных или антропогенных событий можно определить как произведение вероятности  $P_i$  отдельного такого неблагоприятного события (например, аварии или катастрофы) и ожидаемого ущерба  $Y_i$  в результате реализации этого события:

$$R = \sum_i P_i Y_i \quad (1)$$

Следует заметить, что, поскольку  $P_i$  – безразмерная величина (меняющаяся в диапазоне от 0 до 1), а  $Y_i$  – может измеряться в различных величинах (например, в рублях, долларах, тоннах, годах, количестве пострадавших и погибших при авариях и катастрофах и т.д.), то фактически  $R$  – величина размерная.

В современной научной литературе рассматривают несколько способов классификации разновидностей риска, каждая из которых имеет свои особенности.

По причинам возникновения риски подразделяются на несколько групп:

1. *природные риски*, обусловленные катастрофическими природными явлениями (землетрясениями, извержениями вулканов, падениями метеоритов и т.д.);
2. *техногенные риски*, связанные с опасностями, исходящими от техногенных объектов (аварии, взрывы, пожары);
3. *экологические риски*, обусловленные неблагоприятными изменениями в окружающей среде природного и техногенного характера;
4. *биолого-социальные риски*, связанные с эпидемиями и социальными потрясениями и катаклизмами;
5. *экономические риски*, связанные с неблагоприятными изменениями в экономике и т.д.

По своей природе риски подразделяют на две группы:

1. *индивидуальные риски* – характеризующие вероятность поражения одного отдельного объекта, подвергающегося опасности, в результате воздействия опасности определённого уровня за фиксированный интервал времени
2. *коллективные риски* – характеризующие вероятность поражения нескольких (двух и более) объектов, в результате воздействия опасности определённого уровня за фиксированный период времени;

При управлении рисками, их подразделяют также на две группы:

1. *приемлемый риск* – имеющий уровень, с которым общество в целом готово мириться ради получения определенных благ или выгод в результате своей деятельности;
2. *неприемлемый риск* – имеющий уровень, устанавливаемый административными или регулирующими органами, как максимальный, выше которого надо принимать адекватные меры по его устранению.

#### 4. Основные современные концепции обеспечения экологической безопасности

До конца XX века при оценке экологической безопасности чаще всего использовалась концепция «АБСОЛЮТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ» или «НУЛЕВОГО РИСКА» [1-3]. Не следует понимать смысл этих терминов буквально, как отсутствие всякого негативного антропогенного воздействия на окружающую среду и здоровье человека. При использовании такой концепции считалось, что экологическая безопасность и, соответственно, нулевой экологический риск достигаются при условии, что уровень негативного антропогенного воздействия не превышает его нормативно установленных пределов (например, предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ (ПДК) или предельно допустимых уровней различных физических полей (ПДУ) и т.д.). Девиз этой концепции – «РЕАГИРОВАТЬ И ВЫПРАВЛЯТЬ», означает, что в рассматриваемом случае экологическая безопасность определяется возможностью своевременно обнаружить экологическую угрозу (то есть факт превышения уровня негативного воздействия над ПДК и ПДУ) и оперативно ликвидировать её последствия. При таком подходе индикатором уровня опасности является превышение реального негативного воздействия над нормативно установленными ПДК и ПДУ. В то же время, хорошо известно, что даже при уровнях антропогенного воздействия значительно ниже этих уровней негативные последствия для окружающей среды и здоровья человека всё-таки могут иметь место из-за «кумулятивного эффекта».

С начала XXI века прогрессирующее антропогенное загрязнение окружающей среды, быстрый рост использования её невозобновляемых природных ресурсов привели к тому, что способность биосферы к самоочищению и самовосстановлению оказалась на грани исчерпания, и концепция абсолютной безопасности начала постепенно уступать место новому подходу, ориентированному на допущение определенного ненулевого экологического риска, с девизом – ПРЕДВИДЕТЬ И ПРЕДУПРЕЖДАТЬ. Соответствующая концепция получила название «концепции ПРИЕМЛЕМОГО РИСКА», которой соответствовал другой принцип подхода к контролю опасности и безопасности, основанный на оценке приемлемого риска, то есть такого риска с которым общество готово мириться ради получения определенных благ. Индикаторами уровня опасности при этом выступают не формально установленные ПДК и ПДУ, а реальное состояние здоровья человека и близость состояния окружающей среды к критическим уровням. Именно в соответствии с этой концепцией в настоящее время при рассмотрении любого нового проекта природопользования обязательно проводится экологическая экспертиза, в ходе которой оценивается величина приемлемого риска реализации данного проекта. Практически в настоящее время используется некоторая эклектика из этих двух концепций, ко-

гда при оценке экологической безопасности тех или иных морских технологий используются и старые ПДК и ПДУ, и рассчитываются величины индивидуального и коллективного рисков и сопоставляются с приемлемым риском.

#### 5. Стратегия обеспечения экологической безопасности морской среды в Российской Федерации

В соответствии с современными представлениями, государственное управление качеством морской среды в местах интенсивного техногенного воздействия в РФ базируется на адекватной оценке допустимого предела вмешательства человека в саморегулирующиеся природные экосистемы, который может быть различным в разных государствах в зависимости от местных условий [2-5]. Фактически такое управление представляет собой эколого-правовую систему, гарантирующую эффективную охрану окружающей среды в местах наиболее интенсивного техногенного воздействия на нее при соблюдении экономических интересов государства. Эту систему удобно рассматривать как информационную систему, состоящую из четырех информационных подсистем (каждая из которых тоже является информационной системой, но более низкого уровня) в том числе:

1. эколого-правовой;
2. технологической;
3. экономико-правовой;
4. правовой.

Эколого-правые аспекты обеспечения экологической безопасности реализуются через следующие механизмы государственного управления и включают:

1. экологическую экспертизу проектов природопользования, включая оценку воздействия соответствующих техногенных объектов на окружающую среду;
2. экологическое нормирование воздействия на окружающую среду от любых техногенных объектов;
3. экологический мониторинг состояния окружающей среды;
4. экологическое лицензирование;
5. экологическая сертификация;
6. экологический контроль;
7. экологический аудит.

Технологические аспекты этой проблемы предусматривают:

1. совершенствование существующих и разработку новых морских технологий, снижающих техногенное воздействие на морскую среду;
2. внедрение эффективных технологий ликвидации последствий негативного воздействия на морскую среду (включая борьбу с нефтяными разливами)

Экономико-правовые аспекты базируются на совокупности экономических мер стимулирования



экологически сообразной хозяйственной деятельности субъектов и выполнения ими нормативных экологических требований по защите окружающей среды и рациональному природопользованию, в том числе:

1. планирования рационального морепользования;
2. финансирования охраны морской среды от антропогенного загрязнения;
3. платежей за пользование природными ресурсами морской среды и её охрану;
4. экономическое стимулирование рационального морепользования;
- 3.

4. как правовой институт – то есть совокупность юридических норм различных отраслей права (земельного, водного, лесного, горного и т.д.)

Конечная цель внедрения государственной стратегии обеспечения экологической безопасности морских технологий – правомерное и эффективное освоение морской среды и защита её от негативных антропогенных воздействий.

### Заключение

На рубеже XX и XXI веков естественные возможности находящейся под всё более интенсивным техногенным воздействием морской среды к са-

5. экологическое страхование морской деятельности.

Правовые аспекты реализуются через введение эколого-правовой ответственности за совершение экологических правонарушений, причем такая ответственность может рассматриваться в трех аспектах:

1. как государственное принуждение к исполнению экологических требований, предписанных законом;
2. как правоотношение между государством и нарушителем экологической безопасности; мовосстановлению и самоочищению близки к исчерпанию. Поэтому проблема обеспечения её безопасности становится всё более актуальной и требует глубокого анализа негативного воздействия морских технологий на живые и неживые компоненты Мирового океана, играющего столь важную роль в сохранении биосферы всей нашей планеты. Устойчивое развитие цивилизации в этих условиях возможно только при достижении компромисса между необходимостью дальнейшего развития техносферы и сохранения состояния биосферы в виде, пригодном для дальнейшего существования человека и других живых организмов планеты.

### Литература

1. Алешин И.В., Гончаров В.К., Любимов Е.В., Портной А.С., В.Н. Разуваев Безопасность на морских нефтегазопромислах. Учебник для ВУЗов. СПб.: Изд. СПбГМТУ, 323 с.
2. Алешин И.В., Портной А.С. Экологический риск при освоении ресурсов Мирового океана. Монография. СПб.: Изд. СПбГМТУ, 2012, 174 с.
3. Алешин И.В. Охрана окружающей среды при освоении ресурсов Мирового океана. Учебное пособие. СПб.: Изд. СПбГМТУ, 2005, 88 с.
4. Альхименко А.И., Беляев Н.Д., Фомин Ю.Н. Безопасность морских гидротехнических сооружений. Учебное пособие. СПб.: Изд. ЛАНЬ, 2003, 288 с.
5. Коробкин В.И., Передельский Л.В. Экология. Учебник для ВУЗов, Ростов на Дону: Изд. ФЕНИКС, 2005, 575 с.
6. Малкин В. С. Надежность технических систем и техногенный риск. Ростов на Дону: Изд. ФЕНИКС, 2010, 432 с.
7. Правила классификации и постройки морских судов. Том I. НД №2020101077. Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2014, 562 с.

### References

1. Aleshin I.V., Goncharov V.K., Ljubimov E.V., Portnoj A.S., Razuvaev V.N. Bezopasnost' na morskikh neftegazopromyslah, Uchebnik dlja VUZov, Saint-Petersburg, SPbGMTU, 323 p.
2. Aleshin I.V., Portnoj A.S. Jekologicheskij risk pri osvoenii resursov Mirovogo okeana, Monografija, Saint-Petersburg, SPbGMTU, 2012, 174 p.
3. Aleshin I.V. Ohrana okruzhajushhej sredy pri osvoenii resursov Mirovogo okeana. Uchebnoe posobie, Saint-Petersburg. SPbGMTU, 2005, 88 p.
4. Al'himenko A.I., Beljaev N.D., Fomin Ju.N. Bezopasnomt' morskikh gidrotehnicheskikh sooruzhenij. Uchebnoe posobie, Saint-Petersburg, LAN, 2003, 288 p.
5. Korobkin V.I., Peredel'skij L.V., Jekologi, Ros'tov na Donu, FENIKS, 2005, 575 p.
6. Malkin V. S. Nadezhnost' tehniceskikh sistem i tehnogennyj risk. Rostov n/D, Feniks, 2010, 432 p.
7. Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov. Tom I. ND №2 020101 077, Rossijskij morskij registr sudohodstva. , Saint-Petersburg, 2014, 562 p.

**ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА**

УДК 629.7.022, 533.682, 533.6.013.416

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНОВКИ ЭКРАНОПЛАНА****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

**Цао Ян**

аспирант кафедры гидроаэромеханики и морской акустики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: 554020586@qq.com

**Аннотация**

На сегодняшний день существует много различных компоновок экранопланов. Но ни одна из них не позволяет в полной мере использовать экранный эффект и обеспечить автоматическую продольную устойчивость движения аппарата в широком диапазоне высот и углов тангажа.

В работе рассмотрена компоновка, состоящая из нескольких изолированных крыльев и дополненная консолями и горизонтальным оперением.

Варьировались форма, расположение и взаимное влияние различных элементов. Определось, воздействие элемента на подъемную силу и параметры продольной устойчивости.

Проведен численный эксперимент методом CFD. Получена база данных, включающая аэродинамические характеристики – силы и моменты, их производные, положение аэродинамических фокусов и другую информацию, позволяющую оценить возможности компоновки. Сделаны выводы о влиянии формы и расположения различных несущих элементов на суммарные аэродинамические характеристики системы и параметры устойчивости движения.

Показана возможность создания на базе рассмотренной аэродинамической схемы, аппарата, имеющего хорошие несущие способности и удовлетворяющего критерию статической устойчивости в довольно широком диапазоне высот и углов тангажа.

**Ключевые слова** Экраноплан, граница раздела сред, аэродинамическая компоновка, силы и моменты, аэродинамические фокуса, устойчивость продольного движения, теория крыла, горизонтальное оперение, численный эксперимент.

**WIG CRAFT WITH THE SLOTTED WING. AERODYNAMICS FEATURES****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

**Cao Yang**

the Ph.D. candidate of DEPARTMENT OF HYDROAEROMECHANIC AND MARINE ACOUSTICS,  
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: 554020586@qq.com

**Abstract**

**Purpose.** In this paper the configuration which consists of several isolated wings with additional consoles and horizontal tail considered.

**Design/methodology/approach.** In the course of research the form, arrangement and co-influence of various elements, which the configuration consists of, have been varied. It was defined, what influence each element has on lifting power and longitudinal stability parameters.

**Findings.** To accomplish the task a numerical experiment by CFD method has been conducted. As a result, the database which includes aerodynamic characteristics i.e. forces and the moments, their derivatives, aerodynamic focuses position and other information, allowing to estimate configuration possibilities has been established.

Conclusions have been drawn on the influence of the form and arrangement of various bearing elements on total aerodynamic characteristics of the system and movement stability parameters.

**Originality/value.** The possibility of creation of the device on the basis of the considered aerodynamic scheme which has good bearing abilities and satisfies the criterion of static stability in rather wide range of heights and angles of attack has been shown.

**Keywords** WIG craft, ground effect, aerodynamic configuration, forces and the moments, aerodynamic focuses, longitudinal (pitch) stability, wings theory, horizontal tail, CFD.

**Введение**

В работе рассмотрена возможность создания аэродинамической компоновки корабля-экраноплана, удовлетворяющей требованиям к статической устойчивости продольного движения и имеющей хорошие несущие способности.

Актуальность работы связана с продолжающимися поступать сообщениями об авариях экранопланов. В то же время в существующих проектах не удается в полной мере использовать преимущества экранного эффекта, в результате чего аппараты, движущиеся вблизи поверхности, уступают по своим экономическим характеристикам обычным самолетам. Это сдерживает развитие экранопланостроения. Поэтому представляет интерес поиск аэродинамической компоновки, устойчивой при движении и создающую подъемную силу достаточной величины.

**1. Цель и задачи**

Требования, необходимые для обеспечения продольной статической устойчивости, уже давно сформулированы в работе Р.Д.Иродова [1]. Там показано необходимое взаимное расположение фокусов по высоте и по тангажу. Но камнем преткновения является вопрос, каким образом обеспечить нужное положение фокусов. Т.е. какова

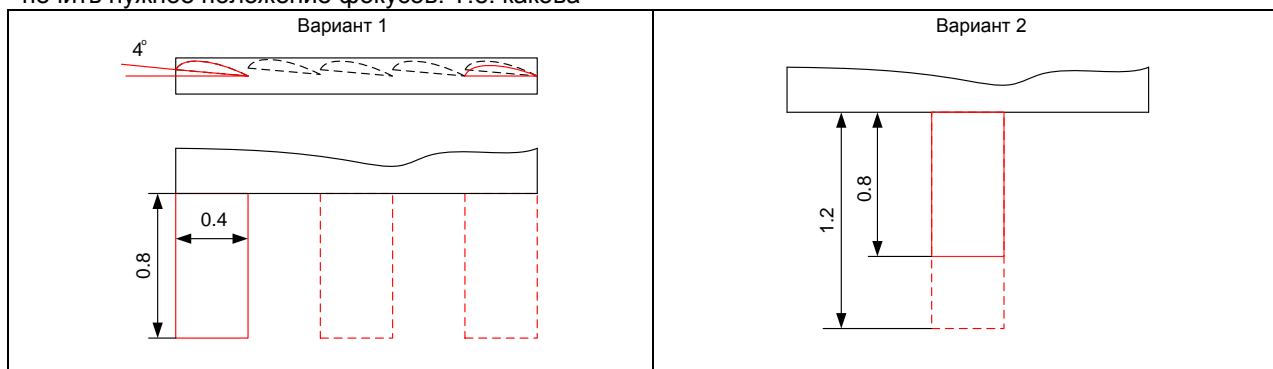
должна быть геометрия аэродинамической компоновки и как те или иные элементы, составляющие компоновку, влияют на разнос фокусов. А также как нужно изменить положение или геометрические параметры элементов, чтобы сместить интересующие нас точки в нужную сторону.

Анализ нескольких, наиболее распространенных, компоновок был выполнен в работе [2]. В ней были сделаны выводы о перспективности той или иной схемы.

**2. Методы и предмет исследований**

В данной работе в качестве объекта исследования было выбрано сложное (щелевое, разрезное) крыло, аэродинамические параметры которого рассматривались в работе [3]. В ней было показано, что такое крыло позволяет получить неплохие параметры подъемной силы, но обеспечивает нужный разнос фокусов только при нулевом угле тангажа.

Чтобы найти пути решения задачи устойчивости, была изучена возможность оборудования исходного крыла (центроплана ЦП), различными дополнительными элементами: консолями и горизонтальным оперением (ГО). Рассматривались следующие варианты изменения геометрии.



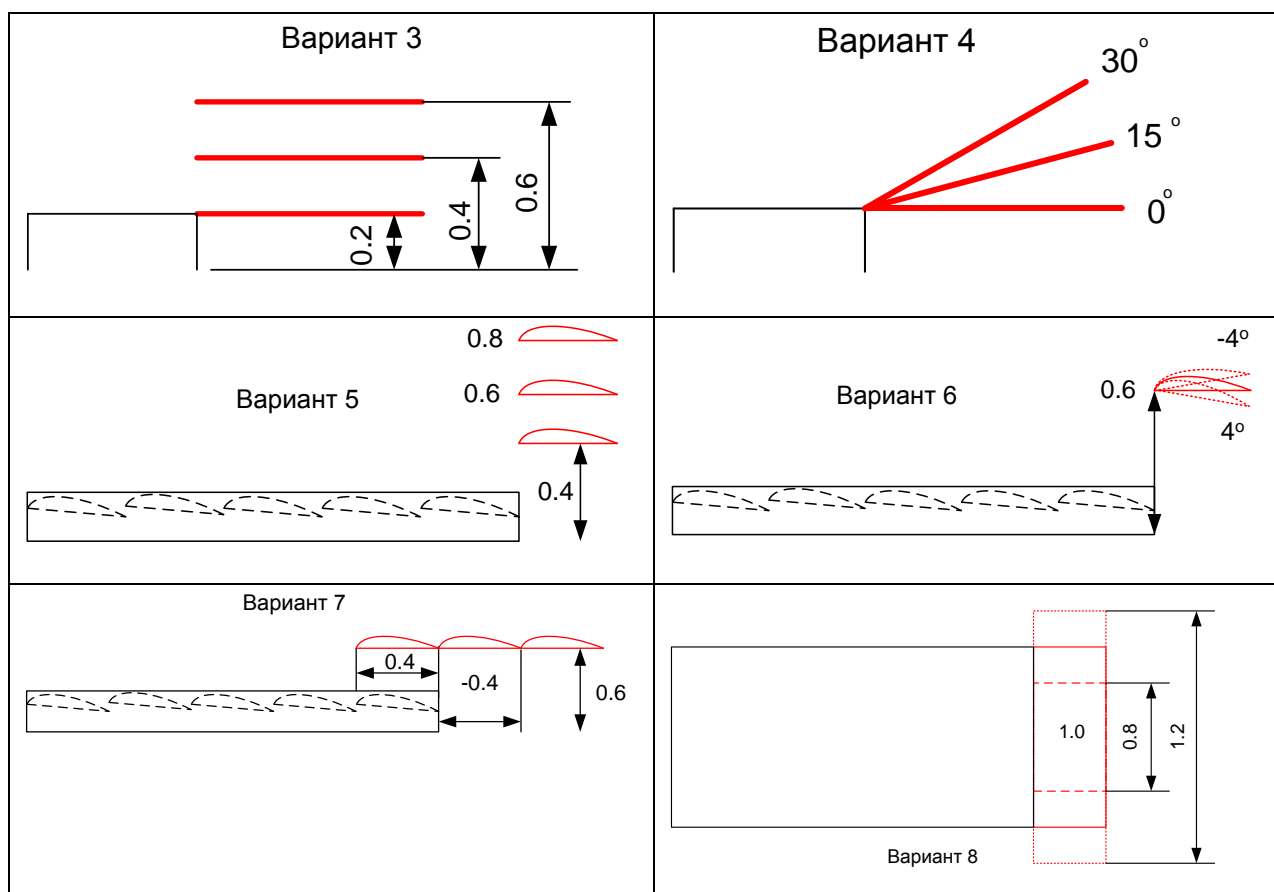


Рис.1. Рассмотренные варианты геометрии элементов компоновки.

В процессе работы с помощью численного эксперимента определялись аэродинамические характеристики системы крыльев у границы раздела сред: коэффициенты аэродинамических сил и моментов, действующих на компоновку, их производные по высоте и углу тангажа и положение аэродинамических фокусов, характеризующих устойчивость движения.

Было проведено большое количество расчетов, в процессе которых варьировались высота полета и углы тангажа для различных вариантов компоновки. Это позволило получить обширный материал для дальнейшего изучения влияния несущих элементов на аэродинамические характеристики и параметры устойчивости.

При расчетах использовалась корабельная система координат. Ось X направлена вперед, по движению аппарата. Ось Z – вверх. Ось Y – на правый борт.

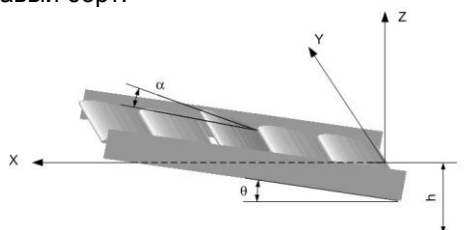


Рис.2. Параметры движения.

$\alpha$  – угол атаки крыла,  $\theta$  – угол тангажа компоновки,  $h$  – высота над экраном

С целью унификации и упрощения сравнения все основные крылья и дополнительные элементы имели плоскую нижнюю поверхность и верхнюю, соответствующую четырехзначному профилю NACA 0010.

Геометрические размеры ЦП соответствовали описанным в [3] – пять крыльев удлинением  $\lambda=2.5$  с плоскими вертикальными шайбами. Все крылья ЦП установлены с углом атаки 8 градусов.

Высота полета обезразмеривалась по хорде одного крыла ЦП  $h_b=h/V$  и менялась в пределах 0.25 до 0.75 с шагом 0.25.

Угол тангажа компоновки в целом изменялся от 0 до 8 градусов с шагом 2 градуса.

Расчеты выполнялись с использованием программного комплекса WINGS, позволяющего моделировать пространственное движение сложных несущих систем вблизи границы раздела. Математическая модель реализована на базе метода дискретных вихрей в идеальной жидкости. Вихревой след моделировался приближенно, заданием положения точки сворачивания вихрей, сходящих с задней кромки.

### 3. Результаты и выводы

Полученные материалы были проанализированы и на их основе сделаны некоторые выводы, позволяющие наметить пути достижения поставленной цели.

В процессе проведения расчетов по перво-

му варианту, консоли, установленные под углом атаки 4о снаружи шайб так, что их задние кромки находились на середине высоты шайбы, перемещались по длине аппарата. Выяснилось, что положение консоли по длине практически не влияет на подъемную силу.

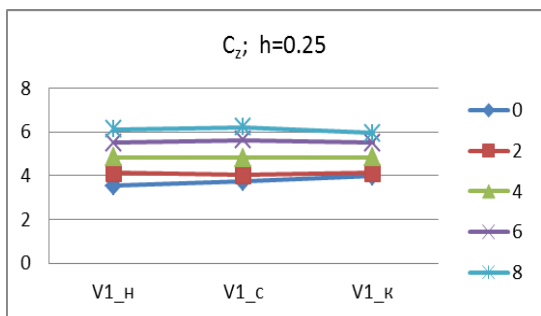
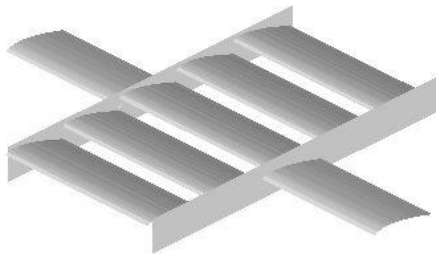


Рис. 3. Изменение коэффициента подъемной силы при изменении продольного положения консолей

Увеличение размаха консолей привело к тривиальному результату: чем больше размах, тем больше подъемная сила. Более интересным является то, что с ростом размаха консолей появляется благоприятный разнос фокусов  $X_{fh}-X_{ft}>0$ . Правда, в рассматриваемом диапазоне это происходит только при минимальной высоте и нулевом угле атаки.

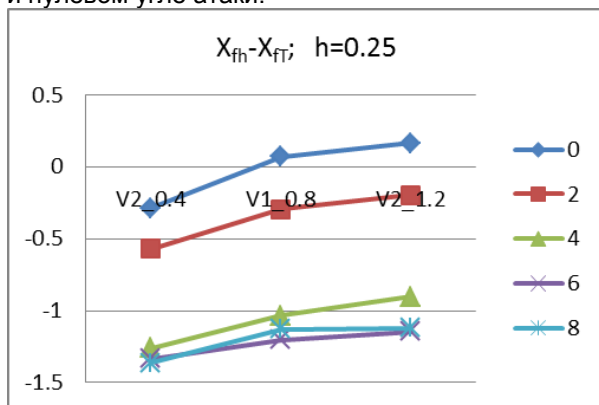


Рис.4. Зависимость разноса фокусов от размаха консолей

Увеличение высоты установки консолей приводит к некоторому снижению подъемной силы, т.к. ослабевает влияние экрана.

Интересным оказался результат по изменению угла V-образности консолей.

Изменение этого угла от 0 до 10 градусов слабо влияет на величину подъемной силы. А вот на положение фокуса по высоте влияет благоприятно, смещая его в нос. Фокус по тангажу при

этом слабо дрейфует в корму. Что в совокупности приводит к улучшению характеристик устойчивости компоновки.

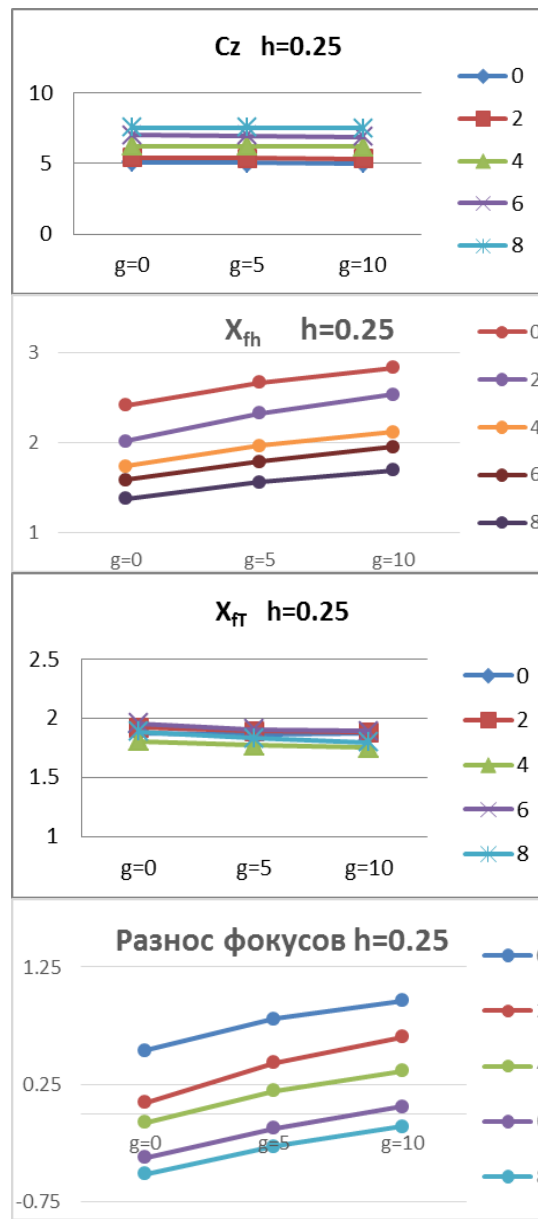
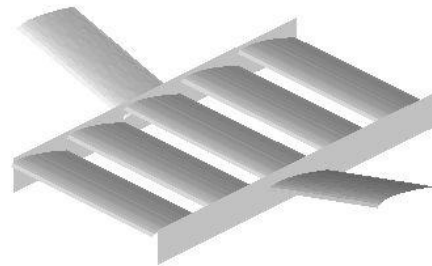


Рис.5. Влияние изменения угла V-образности консолей

Увеличение высоты расположения ГО положительно влияет как на величину подъемной силы, так и на параметры устойчивости. К сожалению, этот путь не очень перспективен по соображениям прочности и условий эксплуатации аппарата.

Было рассмотрено влияние на исследуемые характеристики установочного угла атаки оперения. Анализ полученных результатов позволяет сделать выводы, что увеличение установочного угла от  $-4$  до  $+4$  приводит к незначительному росту подъемной силы, не влияет на положение фокуса по высоте и приводит к смещению в нос фокуса по тангажу. Т.е. уменьшает благоприятный разнос фокусов компоновки.

Смещение ГО в корму и далее за пределы ЦП приводит к значительному улучшению характеристик устойчивости, без изменения несущих параметров. Но этот путь связан с теми же проблемами, что и перемещение ГО по высоте. Надо отметить, что рассматриваемая компоновка позволила получить удовлетворительные параметры устойчивости при сравнительно низком расположении ГО, расположенного непосредственно в районе задней кромки ЦП. И даже в пределах ЦП.

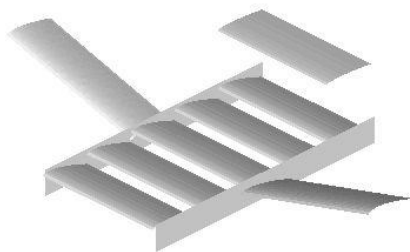


Рис.6. Компоновка с ГО

Варианты изменения размаха ГО показали, что увеличение этого параметра приводит к незначительному росту подъемной силы, практически не влияют на положение фокуса по высоте, слабо смещая его в корму. Но положительно влияют на фокус по высоте. В совокупности, рост размаха ГО приводит к увеличению запаса устойчивости компоновки.

В результате анализа полученных данных на базе рассмотренных элементов удалось создать компоновку, обладающую неплохими несущими характеристиками и удовлетворяющей критерию Р.Д.Иродова в диапазоне от  $0$  до  $6$  градусов угла тангажа на всех рассмотренных высотах. Такие качества позволяют предположить, что самый сложный с точки зрения безопасности момент ухода с экрана такая компоновка позволит совершать достаточно спокойно.

В заключение были рассмотрены варианты компоновки, имеющей одни и те же габариты и дополнительные элементы, но количество крыльев, образующих ЦП менялось:  $1, 2, 3$  и  $5$ .

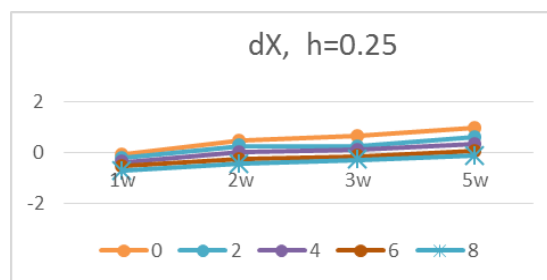
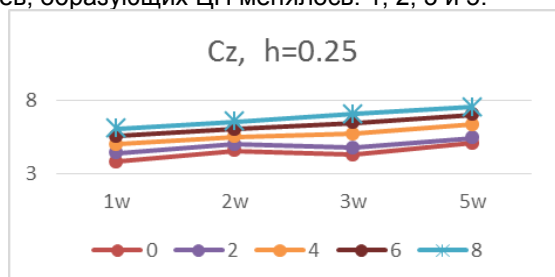


Рис.7. Сравнение компоновок с различными вариантами ЦП

Из приведенных графиков можно сделать вывод, что на больших углах тангажа рост числа крыльев приводит к росту подъемной силы. На малых углах тангажа этого не наблюдается. Что касается разноса фокусов, то увеличение числа крыльев благоприятно сказывается на устойчивости движения. Хотя влияние этого фактора слабое.

Понятно, что все это выводы, сделанные на основе численного эксперимента. Окончательное решение о возможностях подобной компоновки можно будет принимать только после физического эксперимента. Сейчас готовится модель для продувок в аэродинамической трубе СПбГМТУ. По результатам физического эксперимента можно будет сделать окончательные выводы о перспективности данной компоновки и возможных путях улучшения ее характеристик. А также о возможности создания на ее базе реальной машины.

Данные по влиянию ГО не являются чем-то новым. Но они подтвердили существующие ранее результаты и, в частности, позволяют понять одну из причин, почему Р.Е.Алексеев использовал для своих разработок на ранних этапах самолетную схему.

Полученные результаты могут представлять интерес для конструкторов экранопланов. Важным можно считать возможность получить компоновку с увеличенным диапазоном высот и углов тангажа, при которых удастся обеспечить статическую устойчивость продольного движения. Представляет интерес влияние геометрии и расположения отдельных элементов компоновки на величину подъемной силы и на поведение аэродинамических фокусов по высоте и углу тангажа. Полученные данные позволяют целенаправленно изменять аэродинамическую схему для достижения нужных результатов.

### Литература

1. Р.Д.Иродов. Критерии продольной устойчивости экраноплана. *Уч. записки ЦАГИ, т.1, №4, 1970, с. 63-71*
2. А.Р.Бесядовский, А.И.Латушко. Сравнение различных компоновок экранопланов. *Морские интеллектуальные технологии, 1 (15) 2012 с.45-47*
3. А.Р.Бесядовский, Пхио Киав Свар Пхае. Экраноплан с разрезным крылом. *Особенности аэродинамики. Морские интеллектуальные технологии, 2 (28) т.1, 2015 с.9-14*
4. Н.И.Белавин. Экранопланы. *Л.: Судостроение, 1977, 230 с.*
5. В.И.Жуков. Особенности аэродинамики, устойчивости и управляемости экраноплана. *М: ЦАГИ, 1997, 83 с.*

### References

1. R.D.Irodov. Kriterii prodol'noj ustojchivosti jekranoplana. *Uch. zapiski CAGI, t.1, №4, 1970, s. 63-71*
2. A.R.Besjadovskij, A.I.Latushko. Sravnenie razlichnyh komponovok jekranoplanov. *Morskie intel-lektual'nye tehnologii, 1 (15) 2012 s.45-47.*
3. A.R.Besjadovskij, Phio Kiav Svar Phae. Jekranoplan s razreznym krylom. Osobennosti ajerodinamiki. *Morskie intellektual'nye tehnologii, 2 (28) t.1, 2015 s.9-14.*
4. N.I.Belavin. Jekranoplany. *L.: Sudostroenie, 1977, 230 s.*
5. V.I.Zhukov. Osobennosti ajerodinamiki, ustojchivosti i upravljaemosti jekranoplana. *M., CAGI, 1997, 83 s.*

УДК 629.123

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МОРСКИХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

**Идрисова Сабина**

студент кафедры океанотехники и морских технологий  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
198096, Санкт-Петербург, пр. Стачек 88/2  
e-mail: idrisova.93@list.ru

### Аннотация

Для того чтобы выбрать наилучшее конструктивное решение инженерного сооружения, необходимо иметь возможность прогнозирования его поведения в зависимости от различных режимов нагружения. Прогресс в разработке численных методов и компьютерного моделирования позволяет расширить круг задач при проектировании объектов освоения шельфа.

В работе объектом исследования является самоподъемная плавучая установка (СПУ) «Ирбен», используемая для проведения грузоподъемных операций. Строительные размеры элементов корпуса и данные для расчетов приняты из эксплуатационной документации, предоставленной Центральным научно-исследовательским институтом морского и речного флота.

Целью работы является анализ напряженно-деформированного состояния объектов освоения шельфа с использованием метода конечных элементов (МКЭ) на примере СПУ.

Для проведения анализа была разработана конечно-элементная модель установки, определены физические и граничные условия задачи и получены результаты численного решения. На основании результатов общего анализа прочности СПУ, геометрия узла колонны-понтон была модернизирована с целью получения приемлемых напряжений и деформаций.

В результате сравнения двух вариантов решения, был сделан вывод о необходимости проработки важных узлов и деталей конструкции для дальнейших рекомендаций при проектировании. Данная методика позволяет выполнять многовариантные расчеты прочности, рассматривая различные варианты конструкции, и изучить их степень влияния на результаты расчета.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, самоподъемная плавучая установка, морские инженерные сооружения, прочность, напряженно-деформированное состояние, понтон.

## THE APPLYING OF FINITE ELEMENTS METHOD FOR DESIGNING OF MARINE ENGINEERING FACILITIES

**Idrissova Sabina**

the student of the State marine technical university of Saint-Petersburg  
Stachek prospect 88/2, St. Petersburg 198096, Russian Federation  
e-mail: idrisova.93@list.ru

### Abstract

The condition of engineering facilities depends on different variants of influence and in order to choose the best design solution there is necessary to predict the behavior of offshore units. Progress in the development of numerical methods and computer modeling makes it possible to expand the range of tasks in the design of the offshore constructions.

In the work, the research object is a self-elevating floating unit (SEFU) "Irben", which is designed for lifting operations. The structural dimensions of the hull elements and data for calculations are taken from the operational documentation provided by the Central Scientific Research Institute of the Marine and River Fleet.

The aim of the paper is a structural strength analysis of offshore facilities by the finite element method (FEM) with using the presented SEFU.

For the analysis, a three-dimensional finite element model was developed, physical and boundary conditions were determined. Based on the results of the general strength analysis of the SEFU, the geometry of the pontoon and columns assembly have been modernized to obtain acceptable stresses and strains.

From the result of comparing two solutions, it was concluded that it is necessary to work out important details for further recommendations in the design. This method allows carrying out multivariate strength calculations, considering various design options, and studying their influence on the calculation results.



**Key words:** finite element method, self-elevating floating unit, marine engineering facilities, strength, stress-strain state, pontoon.

**Введение**

Морские инженерные сооружения — это сложные в инженерном плане технические объекты. Их конечно-элементная модель, состоящая из опорной конструкции, несущего корпуса и многоярусного верхнего строения, включает как стержневые, так и плоскостные конструктивные элементы.

Так как элементы корпусных конструкций имеют толшины много меньшие, чем их габаритные размеры, то они могут быть представлены в виде совокупности пластин и оболочек различной толщины.

В соответствии с идеологией МКЭ данные пластины могут быть разбиты на конечное число малых расчетных элементов, что позволяет свести решение задачи теории упругости пластин и оболочек к решению системы линейных алгебраических уравнений высокого порядка [1].

Во всех случаях основной задачей расчетов прочности является обеспечение надежности и долговечности металлоконструкций при оптимальных затратах на материалы, изготовление и эксплуатацию.

**1. Описание объекта исследования**

Основные характеристики СПУ «Ирбен» приведены ниже:

Дата и место постройки: 2010, Россия

Класс: (КЕ) \* R3

Район плавания: Ограниченный R3

Длина наибольшая, 24,37 м

Ширина: 17,03 м

Высота борта: 2,4 м

Водоизмещение: 611,79 т

Предел текучести стали марки S355J2G3: 355 МПа

СПУ представляет собой сложное пространственное сооружение (рис. 1), основные элементы которого: десять понтонов, установленные на четыре цилиндрические колонны; спускоподъемное устройство и верхнее строение.



Рис. 1. Общий вид СПУ «Ирбен»

Принцип организации работ заключается в подъеме в рабочее состояние над поверхностью моря палубы на колоннах, которые в свою очередь опираются на грунт. Сами опорные колонны

подвижны относительно понтона и опускаются вертикально вниз в точке проведения работ. На понтоне располагают технологическое оборудование, жилые помещения, может устанавливаться любая строительная техника, в частности, кран или экскаватор.

**2. Алгоритм проведения расчета СПУ**

В различных квалификационных обществах в разработке алгоритма расчета самоподъемных буровых установок с использованием МКЭ, предлагается следующий алгоритм решения поставленной задачи [3].

**2.1. Создание основы конечно-элементной модели понтон-колонны**

Для определения напряжений в понтоне и деформаций в режиме эксплуатации, была разработана трехмерная модель СПУ «Ирбен» в пластинчатой идеализации с использованием Design Modeler - инструмента для подготовки геометрии и ее передачи в расчетный пакет ANSYS.

Понтон и колонны были смоделированы в допущениях достаточной степени имитации прочностных характеристик на основании следующих упрощений [4]:

- конструкция считается линейной системой;
- анализ не включает учет дефектов сварки и технологии изготовления деталей;
- все детали модели упрощены как совокупность плоских стальных пластин.

На рис. 2 представлена упрощенная геометрия исследуемого объекта.

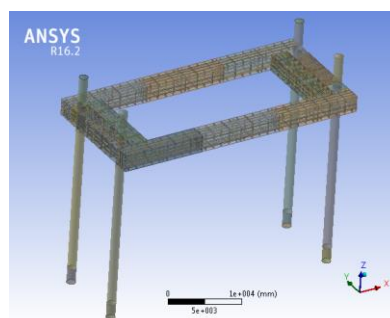


Рис. 2. Геометрическая модель СПУ «Ирбен»

В геометрической модели также смоделированы балки продольного и поперечного набора, кницы, ребра жесткости в соответствии с представленными чертежами конструкции.

На основании вышесказанного детальный набор корпуса понтона приведен на рис. 3.

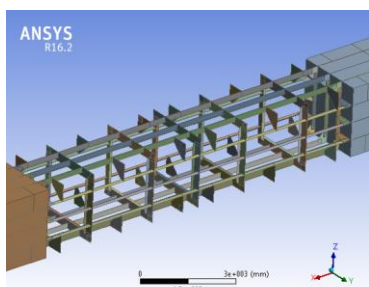


Рис. 3. Набор корпуса понтона СПУ «Ирбен»

Поскольку конструкция и нагрузка симметричны относительно двух взаимноперпендикулярных плоскостей, то в целях уменьшения количества конечных элементов анализ проводился для четверти области решения.

При этом по результатам анализа напряженно-деформированного состояния модели, был разработан второй вариант узла колонна-понтон.

В первом варианте в модели СПУ сохраняется вся исходная геометрия (рис. 4).

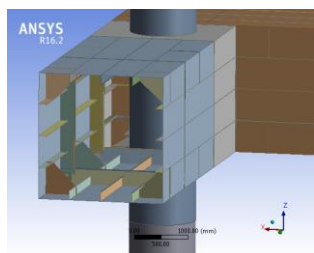


Рис. 4. Первый вариант узел понтон-колонна

Так как в поставленной задаче не рассматриваются контактные взаимодействия, что требует нелинейного анализа, то для учета соединения понтона и колонны во втором варианте модели данный узел дополняется связями в пластинчатой идеализации и включает (рис. 5) [5, 6]:

1. Направляющие опор
2. Устройства фиксации
3. Диафрагмы по всей высоте колонны

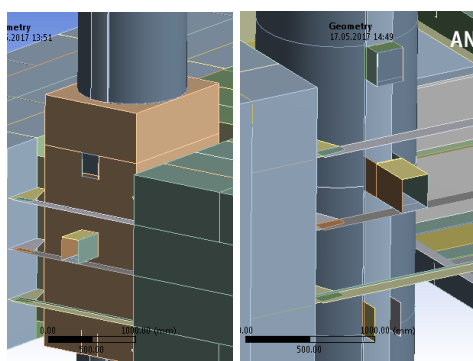


Рис. 5. Второй вариант узел понтон-колонна

Такие конструктивные изменения были подобраны на основании рекомендаций и правил Det Norske Veritas, а также опыта зарубежных проектов [7].

### 2.2. Генерация конечно-элементной сетки

Создание произвольной сетки выполняется в модуле симуляции Mechanical.

Для понтона как составной детали генерируется единая сетка.

### 2.3. Этап 2 – наложение на модель необходимых физических условий и решение задачи

После задания толщин и выбора материалов в блоке Mechanical была выполнена настройка свойства контактов отражающих реальные свойства данной сборной конструкции.

Был применен контакт bonded, подразумевающий полную склейку двух контактирующих объектов и работу их как единого целого без разделения. Таким образом на границе различных геометрических объектов узлы объединяются, что не требует определение контактных условий на границе.

Для задания граничных условий по указанным элементам была применена команда symmetry, считая, что они лежат в плоскости симметрии и все точки не перемещаются через ее ось.

К колонне в районе расположения башмака прилагается жесткая заделка [8].

### 2.4. Моделирование нагрузок

Для оценки напряженно-деформированного состояния СПУ к понтону прилагаются следующие нагрузки:

- вес понтона СПУ;
- эксплуатационные нагрузки (вес крана), распределенная по настилу верхней палубы среднего понтона. Т.к. модель симметрична относительно двух плоскостей, нагрузка, которую испытывает установка от веса крана, составляет 40 т.

### 2.5. Этап 3 – анализ результатов расчета

Напряженно-деформированное состояние упрощенной модели СПУ по первому варианту показана на рисунке 5 и 6.

Как видно из рис. 5 выполненный расчет напряжений МКЭ позволил получить довольно неравномерную картину их распределения с явно выраженной концентрацией в настиле днища понтона, что связано с распределением нагрузки между колонной и понтоном.

Максимальная величина пиковых напряжений составляет порядка 1600 МПа, что является результатом возникновения сингулярности. Предположительно в этой ограниченной области напряжения среаксируют в пластическое течение металла и остальной конструкции не повредят.

Максимальное смещение системы составляет порядка 64 мм в среднем понтоне, что обусловлено действием распределенной нагрузки от крана.

Принимая за предельное эквивалентное напряжение порядка 800 МПа, прочность понтона в районе расположения колонны не обеспечивается.

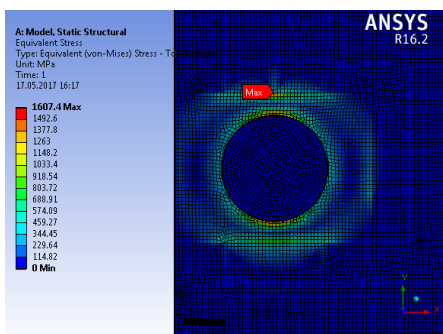


Рис. 5. Картина эквивалентных напряжений по Мизесу в районе настила днища понтона (вариант 1)

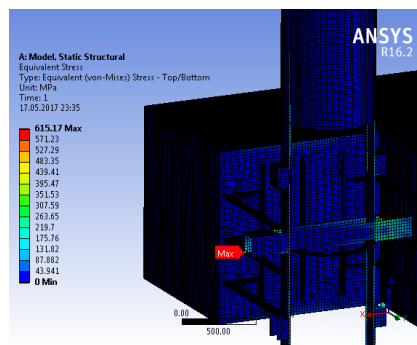


Рис. 7. Картина эквивалентных напряжений по Мизесу в районе настила днища понтона (вариант 2)

Как видно из рис. 6 максимальные напряжения в колонне возникают в месте контакта колонны с корпусом понтона и составляют 118,39 МПа, что не превышает предел текучести материала.

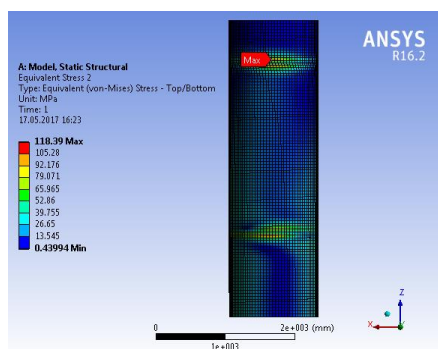


Рис. 6. Картина эквивалентных напряжений по Мизесу в сечении колонны (вариант 1)

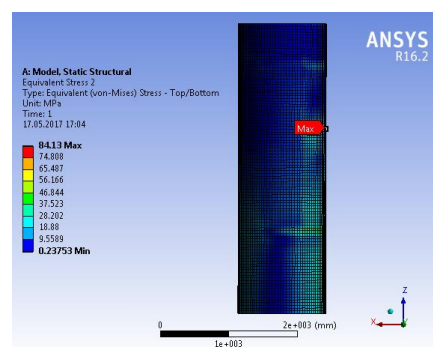


Рис. 8. Картина эквивалентных напряжений по Мизесу в сечении колонны (вариант 2)

Напряженно-деформированное состояние упрощенной модели СПУ по второму варианту показана на рисунке 7 и 8.

Из рис. 7 видно, что в месте контакта направляющей колонны и бортового стрингера возникают пиковые напряжения в 615,17 МПа, что связано с наличием области сопряжения отдельных элементов конструкции между собой.

За счет учета в модели СПУ устройства фиксации колонны и понтона и направляющих колонн, напряжения в конструкции были снижены в 2,5 раза.

### Заключение

Был изучен опыт российских и зарубежных инжиниринговых проектов [9,10] и рекомендации по применению МКЭ к расчету морских инженерных сооружений. Методика расчета таких конструкций позволяет проводить оценку их работы не поэлементно, а как единой пространственной системы.

Для анализа напряженно-деформированного состояния СПУ «Ирбен» использовалось программное обеспечение ANSYS, на базе которого были разработаны следующие три расчетные модели установки:

Вновь принимая во внимание линейную постановку задачи, примем наибольшие напряжения, испытываемые установкой в направляющих порядка 350 МПа, что обеспечивает безопасную эксплуатацию сооружения.

Максимальное смещение системы составляет порядка 26 мм в направлении действия распределенной нагрузки от крана.

Приведенные результаты решения свидетельствуют об актуальности применения МКЭ при проектировании сооружений океанотехники, что дает возможность их переоборудования, рассчитать различные варианты подкрепления узла соединения и выбрать оптимальную по критерию «прочность—масса» конструкцию подкрепления.

Первая модель СПУ (половина установки), массой 112 т включает все конструктивные элементы в количестве 1200 тел, Сгенерированная на основе модели сетка состоит из 659930 элементов и включает 156 контактов.

Вторая модель СПУ (четверть установки), массой 56 т включает все конструктивные элементы в количестве 604 тел, Сгенерированная на основе модели сетка состоит из 326163 элементов и включает 19 контактов.

Третья модель СПУ (четверть установки), массой 60 т включает все конструктивные элементы в количестве 656 тел, Сгенериро-

ванная на основе модели сетка состоит из 385579 элементов и включает 27 контактов с установленными диафрагмами по сечению колонны, направляющих и устройства фиксации.

При расчете второй модели были получены неприемлемые деформации понтона, что потребовало изменения узла соединения колонна-пonton в районе расположения опорно-подъемного устройства и анализа прочности по третьей модели установки. Во всех расчетных моделях СПУ имеются точечные скачки напряжений в локальных зонах конструкции понтона. Это обусловлено сгущением конечно-элементной сетки и не учета нелинейных деформаций модели.

Сравнение двух вариантов СПУ, показало, что направляющие, предусмотренные в третьей мо-

дели, осуществляют плотный контакт с элементами опоры, воспринимают часть нагрузки от крана, распределяют ее по корпусу понтона и противостоят значительной части изгибающего момента. Устройство фиксации опор, входящие в контакт с рейками, обеспечивают жесткое закрепление между опорой и понтоном, что исключает относительные перемещения колонны внутри корпуса.

Таким образом, данная методика позволила выполнить многовариантные расчеты прочности, определять критические узлы объекта, рассматривать различные варианты их конструктивного оформления и оценивать степень влияния конструктивных изменений отдельных узлов на прочность объекта в целом.

### Литература

1. Бутяга С., Кабанов Ю. Судостроение и проектирование морских сооружений. Инженерно-технический журнал «ANSYS Advantage. Русская редакция». М., весна 2008 (7) – 53 стр.
2. 04365-02 GT platform. Construction container pontoons CP 4088 UNIT 2 – 7, 2004.
3. Amine EL GHARBAOUI. Advanced analysis for site assessment and life extension of self-elevating units. Bureau Veritas, Paris, October 2016, 33 p.
4. DNV-OS-C101: “Design of Offshore Steel Structures, General (LRFD Method)”, April 2004.
5. Chirica, I., Lupascu, D. and Beznea, E.- F. (2015) Design Solutions for Jack up Platform Retrofitting. World Journal of Engineering and Technology, 3, 134 -148 стр.
6. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок (ПБУ) и морских стационарных платформ (МСП). — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2006. – 366 с.
7. Self-elevating Units. Recommended Practice DNV-RP-C104, January 2012, 85 p.
8. DesignModeler Help, ANSYS Release 11.0, January 2007, 286 p.
9. ISSC Committee III.1: Ultimate Strength. 16th International ship and offshore structures congress 20-25 August 2006 Southampton, UK, 90 p.
10. The Jack-up Drilling Platform. Design and Operation / edited by L.F. Boswell, Department of Civil Engineering, The City University, London, 1986, 56–65 p.

### References

1. Butyaga S., Kabanov Yu. Sudostroenie i proektirovanie morskikh sooruzheniy. Inzhenerno-tekhnicheskii zhurnal «ANSYS Advantage. Russkaya redaktsiya». M., vesna 2008 (7) – 53 str.
2. 04365-02 GT platform. Construction container pontoons CP 4088 UNIT 2 – 7, 2004.
3. Amine EL GHARBAOUI. Advanced analysis for site assessment and life extension of self-elevating units. Bureau Veritas, Paris, October 2016, 33 p.
4. DNV-OS-C101: “Design of Offshore Steel Structures, General (LRFD Method)”, April 2004.
5. Chirica, I., Lupascu, D. and Beznea, E.- F. (2015) Design Solutions for Jack up Platform Retrofitting. World Journal of Engineering and Technology, 3, 134 -148 стр.
6. Rossiyskiy Morskoy Registr Sudokhodstva. Pravila klassifikatsii, postroyki i oborudo-vaniya plavuchikh burovykh ustanovok (PBU) i morskikh statsionarykh platform (MSP). — SPb.: Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2006. – 366 s.
7. Self-elevating Units. Recommended Practice DNV-RP-C104, January 2012, 85 p.
8. DesignModeler Help, ANSYS Release 11.0, January 2007, 286 p.
9. ISSC Committee III.1: Ultimate Strength. 16th International ship and offshore structures congress 20-25 August 2006 Southampton, UK, 90 p.
10. The Jack-up Drilling Platform. Design and Operation edited by L.F. Boswell, Department of Civil Engineering, The City University, London, 1986, 56–65 p.

УДК 534.26

## ВЫЧИСЛЕНИЕ ФАЗОВЫХ СКОРОСТЕЙ ТРЕХМЕРНЫХ ИЗГИБНЫХ ВОЛН В ИЗОТРОПНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СТЕРЖНЯХ И ОБОЛОЧКАХ С ПОМОЩЬЮ ПОТЕНЦИАЛОВ ДЕБАЯ И «ТИПА ДЕБАЯ»

**Ильменков Сергей Львович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры судовой автоматики и измерений  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: ilms@rambler.ru

**Клещёв Александр Александрович**

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: alexalex-2@yandex.ru

**Ксения Александровна Клубина**

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: kklyubina@yahoo.com

### Аннотация

Представлены математические модели для расчёта распространения упругих волн в упругих стержне и оболочке. Изучаются фазовые скорости упругих волн в изотропном цилиндрическом стержне произвольного радиуса  $a$ , рассчитываются фазовые скорости этих волн в упругой оболочке. Рассмотрены два представления (через потенциалы Дебая и потенциалы «типа Дебая») векторного потенциала  $A$  и вектора смещения и изотропных цилиндрических стержне и оболочке. На основе такого подхода получены характеристические уравнения (как результат решения гранично-контактных задач) для волновых чисел трехмерных изгибных волн в этих телах, а в дальнейшем вычислены (с помощью ЭВМ) и проанализированы фазовые скорости этих волн. Результаты представлены графически.

**Ключевые слова:** потенциал Дебая, распространение волны, продольная волна, изгибная волна, стержень, оболочка.

## THE APPLICATION OF THE DEBYE AND LIKE-DEBYE POTENTIALS FOR CALCULATIONS OF THE PHASE VELOCITIES OF TREE-DIMENSIONAL BENDING WAVES IN DIFFERENT SOLIDS

**Ilmenkov Sergey Lvovich**

docent, candidate of engineering sciences,  
associate professor at the department of ship automation and measurements  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: ilms@rambler.ru

**Kleshchev Alexander Alexander**

the professor, doctor of physico-mathematical sciences,  
the professor of department of physics  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: alexalex-2@yandex.ru

**Klyubina Kseniya Aleksandrovna**

candidate of engineering sciences,  
associate professor at the department of ship automation and measurements  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: kklyubina@yahoo.com

Abstract

Mathematical models for the calculation of elastic wave propagation in elastic rods and shells are presented. We studied the phase velocity of elastic waves in isotropic cylindrical rod of arbitrary radius  $a$  and calculated phase velocities of these waves in elastic shell. We considered two representations (by means of Debye potentials and "like Debye" potentials) of the vector potential  $\mathbf{A}$  and the displacement vector  $\mathbf{u}$  of isotropic cylindrical rod and shell. On the basis of such approach characteristic equations (as a result of solving boundary-contact problems) are obtained for the wave numbers of three-dimensional bending waves in these bodies, and further phase velocity of these waves are calculated (by computer) and analyzed. The results are presented graphically.

**Keywords:** Debye potential, propagation of elastic wave, longitudinal wave, bending wave, rod, shell.

Работа [1] исследует волновое движение в изотропном упругом слое. Волновые процессы в упругом слое на высоких частотах мало чем отличается от таких же процессов в оболочке. Математические модели для расчёта распространения упругих волн в упругих стержне и оболочке весьма схожи. В данной же работе вслед за [2-5] изучаются фазовые скорости упругих волн в изотропном цилиндрическом стержне произвольного радиуса  $a$ . В отличие от [2-5] обратимся к строгому решению задачи о фазовой скорости трехмерной изгибной волны в таком стержне [6-9]. Во второй части рассчитываются фазовые скорости этих волн в упругой оболочке. Новизна данного исследования заключается в вычислении фазовых скоростей трехмерных изгибных волн изотропных стержней и оболочек с помощью строгого метода, основанного на использовании уравнений динамической теории упругости и потенциалах Дебая и «типа Дебая».

Плотность материала стержня обозначим через  $\rho$ , коэффициенты Ламе –  $\lambda$  и  $\mu$ , изотропный стержень помещен в вакуум. Вектор смещения стержня  $\mathbf{u}$  подчиняется уравнению Ламе:

$$(\lambda + 2\mu) \text{grad div } \mathbf{u} - \mu \text{rot rot } \mathbf{u} = -\rho\omega^2 \mathbf{u}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – круговая частота гармонических колебаний.

Вектор смещения  $\mathbf{u}$  упругого стержня, по теореме Гельмгольца, представляется в виде комбинации скалярной функции  $\Phi$  и векторной функции  $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{u} = -\text{grad}\Phi + \text{rot } \mathbf{A}. \quad (2)$$

Векторная функция  $\mathbf{A}$  выражается через потенциалы «типа Дебая»  $\chi$  и  $\Psi$  [10, 11], которые близки к потенциалам Дебая  $U$  и  $V$ , данных в [6] но, в отличие от потенциалов Дебая, удобнее для применения в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$ .

$$\mathbf{A} = \chi \mathbf{e} + a \text{rot}(\Psi \mathbf{e}), \quad (3)$$

где  $\mathbf{e}$  – единичный вектор.

Компоненты вектора смещения в цилиндрических координатах  $\mathbf{u}(u_r, u_\varphi, u_z)$  представляются через потенциал  $\Phi$  и цилиндрические компоненты функции  $\mathbf{A}(A_r, A_\varphi, A_z)$  [6, 7]:

$$\left. \begin{aligned} u_r &= -\frac{\partial\Phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial\varphi} - \frac{\partial A_\varphi}{\partial z}; \\ u_\varphi &= -\frac{1}{r} \frac{\partial\Phi}{\partial\varphi} + \frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r}; \\ u_z &= -\frac{\partial\Phi}{\partial z} + \frac{1}{r} A_\varphi + \frac{\partial A_r}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial A_r}{\partial\varphi}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Цилиндрические компоненты  $A_r, A_\varphi, A_z$  функции  $\mathbf{A}$ , можно выразить через потенциалы  $\chi$  и  $\Psi$  следующим образом:

$$A_r = \frac{a}{r} \frac{\partial\Psi}{\partial\varphi}; \quad (5)$$

$$A_\varphi = -a \frac{\partial\Psi}{\partial r}; \quad (6)$$

$$A_z = \chi. \quad (7)$$

Потенциалы  $\Phi, \chi, \Psi$  разложены по собственным функциям скалярного уравнения Гельмгольца:

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= e^{ikz} \sum_{m=0}^{\infty} A_m J_m(h'r) \cos(m\varphi); \\ \Psi &= e^{ikz} \sum_{m=0}^{\infty} B_m J_m(k'r) \cos(m\varphi); \\ \chi &= e^{ikz} \sum_{m=1}^{\infty} C_m J_m(\kappa'r) \sin(m\varphi), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где  $k$  – искомое волновое число трехмерной изгибной волны;  $A_m, B_m, C_m$  - неизвестные коэффициенты, которые определяются граничных условий на поверхности стержня: нормальное и касательные напряжения отсутствуют;

$h' = (h^2 - k^2)^{1/2}$ ;  $\kappa' = (\kappa^2 - k^2)^{1/2}$ ;  $h$  – волновое число продольной волны в материале стержня;  $\kappa$  – волновое число поперечной волны;  $J_m(h'r)$  - цилиндрическая функция Бесселя.

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_r}{\partial r} + \lambda \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial\varphi} + \frac{1}{r} u_r + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right]_{r=a} = 0 \quad (9)$$

$$\left. \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{1}{r} u_\varphi + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial\varphi} \right|_{r=a} = 0; \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right|_{r=a} = 0. \quad (11)$$

Подставляя разложения (8) в граничные условия (9)-(11), приходим к определителю 3-го порядка:

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} a_{11} &= -(\lambda + 2\mu)J_m''(h'a) + \lambda[(a^{-2}m^2 + k^2) \times \\ &\quad \times J_m(h'a) - a^{-1}J_m'(h'a)]; \\ a_{12} &= 2\mu aikJ_m''(\kappa'a); \\ a_{13} &= 2\mu a^{-1}m[J_m'(\kappa'a) - a^{-1}J_m(\kappa'a)]; \\ a_{21} &= 2\mu a^{-1}[J_m'(h'a) - a^{-1}J_m(h'a)]; \\ a_{22} &= 2ikma^{-1}J_m(\kappa'a) - 2ikmJ_m'(\kappa'a); \\ a_{23} &= -J_m''(\kappa'a) - m^2a^{-2}J_m'(\kappa'a) + \\ &\quad + a^{-1}J_m'(\kappa'a); \\ a_{31} &= -2ikJ_m'(h'a); \\ a_{32} &= a^{-1}J_m'(\kappa'a)[m^2 - a^{-2}k^2 + 1] - 2m^2a^{-2} \times \\ &\quad \times J_m(\kappa'a) - J_m''(\kappa'a) - aJ_m'''(\kappa'a); \\ a_{33} &= ikma^{-1}J_m(\kappa'a). \end{aligned}$$

Этот определитель полностью совпадает с определителем, полученным с использованием потенциалов Дебая, что подтверждает правильности выбранного способа решения задачи.

Для получения характеристического уравнения для нахождения волновых чисел трехмерных изгибных волн приравняем определитель (12) к нулю, что обеспечивает его нетривиальное решение, а радиус стержня  $a=1.0$ .

Были выполнены расчеты для фазовых скоростей продольной и изгибной волн. Результаты этих расчетов представлены на рис 1 и рис. 2.

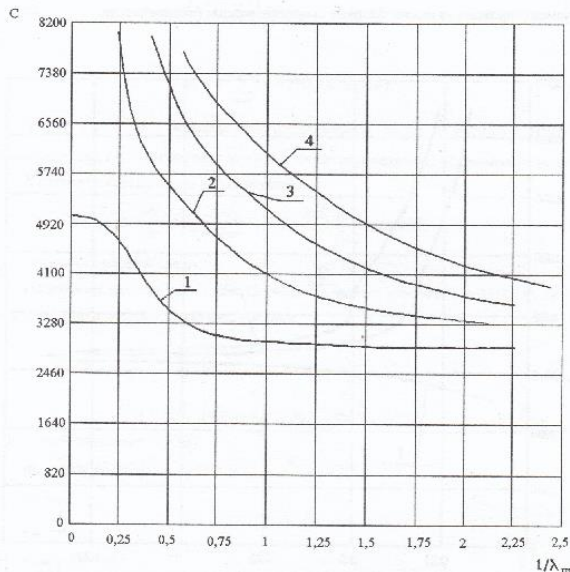


Рис. 1. Фазовые скорости первых четырех

мод продольной волны в стержне.

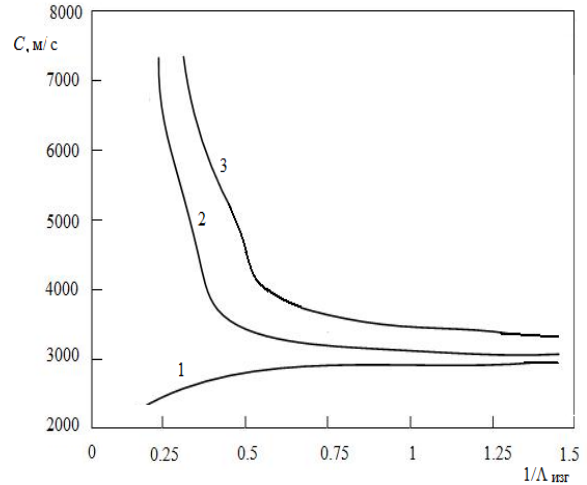


Рис. 2. Фазовые скорости первых трех мод изгибной волны в стержне.

Где  $\lambda_{пр}$  - длина продольной волны,  $\lambda_{изг}$  - длина изгибной волны.

При изучении изгибной волны в изотропной цилиндрической оболочке необходимо учесть вторую (внутреннюю) граничную поверхность, что приводит к увеличению числа неизвестных и числа граничных условий. Тогда разложения потенциалов  $\Phi$ ,  $V$  и  $U$  принимают вид [15-17]:

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= e^{ikz} \sum_{m=0}^{\infty} \cos m\varphi [A_m J_m(h'r) + B_m N_m(h'r)]; \\ V &= e^{ikz} \sum_{m=0}^{\infty} \cos m\varphi [C_m J_m(\kappa'r) + D_m N_m(\kappa'r)]; \\ U &= e^{ikz} \sum_{m=1}^{\infty} \sin m\varphi [E_m J_m(\kappa'r) + F_m N_m(\kappa'r)], \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где  $A_m, B_m, C_m, D_m, E_m, F_m$  - неизвестные коэффициенты, определяемые из граничных условий на внешней ( $r=a$ ) и внутренней ( $r=b$ ) поверхностях оболочки,

$h' = (k_1^2 - k^2)^{1/2}$ ;  $\kappa' = (k_2^2 - k^2)^{1/2}$ ;  $N_m(h'r)$  - цилиндрическая функция Неймана.

Граничные условия, заключающиеся в отсутствии напряжений на обеих поверхностях оболочки ( $r=a$  и  $r=b$ ), принимают вид:

$$(\lambda + 2\mu) \left. \frac{\partial u_r}{\partial r} + \lambda \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} u_r + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right] \right|_{r=a; r=b} = 0 \quad (18)$$

$$\left. \left( \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} u_\varphi + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} \right) \right|_{r=a, r=b} = 0 \quad (19)$$

$$\left. \left( \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \left( \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right|_{r=a, r=b} = 0 \quad (20)$$

Подставляя разложения (17) в граничные условия (18)-(20) (с использованием ортогональности тригонометрических функций  $\cos m\varphi$  и  $\sin m\varphi$ ) приходим к определителю шестого порядка для моды  $m$  3-х мерных изгибных волн следующего вида [15-17]:

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{vmatrix}, \quad (21)$$

Выражения для членов определителя (21) даны в [16].

Раскрываем определитель (21) приравняв его к нулю, получим характеристическое уравнение для волновых чисел моды  $m$  трехмерных изгибных волн в изотропной цилиндрической оболочке произвольной (но постоянной) толщины.

Решение этого уравнения для стальных и алюминиевых оболочек различной толщины представлено на рис. 3 и 4, при этом наружный радиус  $a$  был принят равным 1.0, а внутренний радиус  $b$  принимал два значения:  $b=0.99$  (сплошная кривая) и  $b=0.8$  (пунктирная кривая). На графиках показаны значения скоростей  $C_1$  - продольной,  $C_2$  - поперечной и  $C_R$  - волны Рэлея. Значение  $m=1$  соответствует нулевой моде изгибной волны, скорость которой асимптотически стремится к скорости волны Рэлея  $C_R$ ;  $\Lambda$  - длина продольной волны в материале оболочки:

$$\Lambda = c_1 / f, \text{ где } f - \text{ частота волны в Гц.}$$

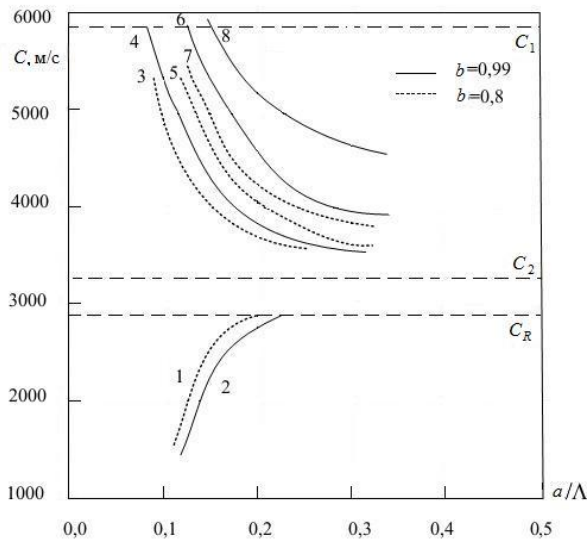


Рис. 3. Фазовые скорости трехмерных изгибных волн в стальных оболочках.

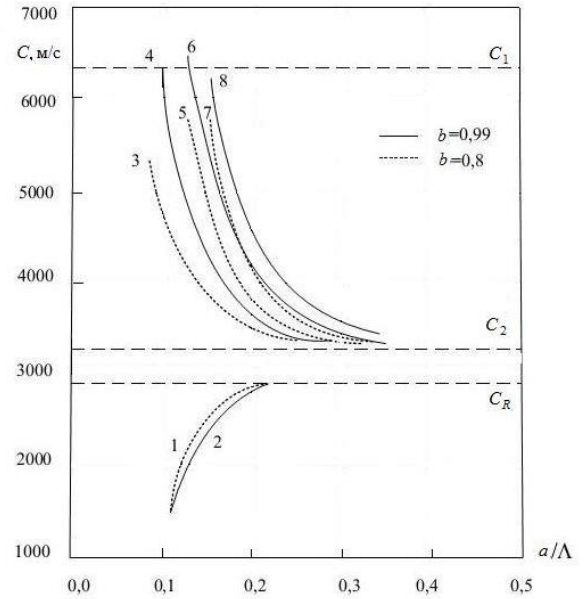


Рис. 4. Фазовые скорости трехмерных изгибных волн в алюминиевых оболочках.

Теперь перейдем к осесимметричным изгибным и продольным волнам. В соответствии с [16, 17] в осесимметричном случае граничные условия (18)-(20) упрощаются: условие (19) исчезает, а условие (18) принимает вид (при этом индекс  $m=0$  или 1):

$$(\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_r}{\partial r} + \lambda \left[ \frac{1}{r} u_r + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right]_{r=a; r=b} = 0 \quad (22)$$

Определитель 4-го порядка, получаемый из граничных условий, имеет вид [15-17]:

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{34} & a_{44} \end{vmatrix}; \quad (23)$$

где:

$$\begin{aligned} a_{11} &= -(\lambda + 2\mu) J_0''(h'a) + \\ &+ \lambda [k^2 J_0(h'a) - a^{-1} J_0'(h'a)]; \\ a_{12} &= -(\lambda + 2\mu) N_0''(h'a) + \\ &+ \lambda [k^2 N_0(h'a) - a^{-1} N_0'(h'a)]; \\ a_{13} &= -2i\mu k J_1'(\kappa'a); \\ a_{14} &= -2i\mu k N_1'(\kappa'a); \\ a_{21} &= -(\lambda + 2\mu) J_0''(h'b) + \\ &+ \lambda [k^2 J_0(h'b) - b^{-1} J_0'(h'b)]; \\ a_{12} &= -(\lambda + 2\mu) N_0''(h'b) + \\ &+ \lambda [k^2 N_0(h'b) - b^{-1} N_0'(h'b)]; \\ a_{23} &= -2i\mu k J_1'(\kappa'b); \\ a_{24} &= -2i\mu k N_1'(\kappa'b); \\ a_{31} &= -2i k J_0'(h'a); \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 a_{32} &= -2ik N'_0(h'a); \\
 a_{33} &= (k^2 - 1)J_1(\kappa'a) + J'_1(\kappa'a) + J''_1(\kappa'a); \\
 a_{34} &= (k^2 - 1)N_1(\kappa'a) + N'_1(\kappa'a) + N''_1(\kappa'a); \\
 a_{41} &= -2ik J'_0(h'b); \\
 a_{42} &= -2ik N'_0(h'b); \\
 a_{43} &= (k^2 - 1)J_1(\kappa'b) + J'_1(\kappa'b) + J''_1(\kappa'b); \\
 a_{44} &= (k^2 - 1)N_1(\kappa'b) + N'_1(\kappa'b) + N''_1(\kappa'b);
 \end{aligned}$$

Приравнявая определитель (23) к нулю и раскрывая его, получим характеристическое уравнение для волновых чисел изгибных и продольных осесимметричных волн.

Определитель второго порядка (24) для осесимметричных крутильных волн дается в [16], его компоненты имеют вид:

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= a^{-1}J'_1(\kappa_1 a) - a^{-2}J_1(\kappa_1 a); \\
 a_{12} &= a^{-1}N'_1(\kappa_1 a) - a^{-2}N_1(\kappa_1 a); \\
 a_{21} &= b^{-1}J'_1(\kappa_1 b) - b^{-2}J_1(\kappa_1 b); \\
 a_{22} &= b^{-1}N'_1(\kappa_1 b) - b^{-2}N_1(\kappa_1 b),
 \end{aligned}$$

где  $\kappa_1 = (k_2^2 - k^2)^{1/2}$ ,  $k$  - искомое волновое число осесимметричной крутильной волны в оболочке.

Раскрывая определитель (24) и приравнявая его к нулю, получим характеристическое уравнение для волновых чисел осесимметричных крутильных волн.

На рис. 5 представлены фазовые скорости осесимметричных изгибных, продольных и крутильных волн. Кривая 1 характеризует фазовую скорость нулевой моды изгибной волны; 2 – нулевой моды продольной волны; кривые 3, 4, 5 – ненулевых мод продольной и изгибной волн; прямая 6 – нулевой моды крутильной волны; 7 – первой моды крутильной волны.

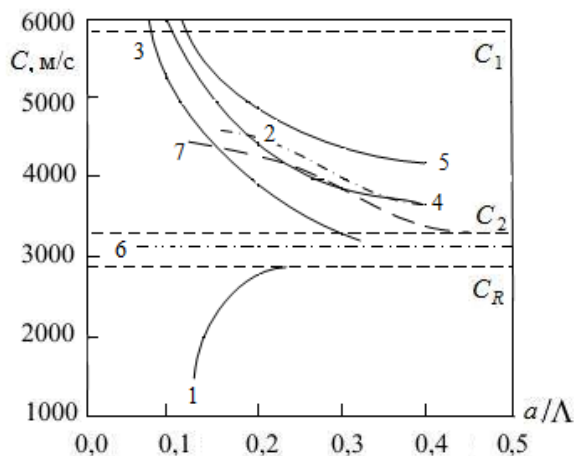


Рис. 5. Фазовые скорости изгибной, продольной и крутильной осесимметричных волн в оболочке.

Основным результатом представленного в статье исследования является вычисление фазовых скоростей трехмерных изгибных волн изотропных стержней и фазовых скоростей трехмерных и осесимметричных изгибных волн цилиндрических оболочек.

В рамках проводимых авторами статьи экспериментальных исследований [18] предполагается выполнить сравнение теоретических и экспериментальных значений фазовых скоростей изгибных волн в упругих цилиндрических оболочках.

Представленные в статье результаты получены при проведении поисковой научно – исследовательской работы в рамках Государственного контракта П 242 от 21 апреля 2010 года ФЦП «Научные и научно – педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 годы».

## Литература

1. Achenbach J.D., Xu Y. Wave motion anisotropic elastic Layer generated by a timeharmonic point load of arbitrary direction. // J. A. S. A. 1999. V. 106.N1. P.84-90.
2. Bancroft D. The velocity of longitudinal waves in cylindrical bars. // Phys. Rev. 1941. V. 59. N4. P. 588-593.
3. Hudson G.E. Dispersion of elastic waves in solid circular cylinders. // Phys. Rev. V. 63. N1. P. 46-51.
4. Davies R.M. Critical study of the Hopkinson pressure. // Phil. Of the Royal Soc. of London. 1948. V. 240. Ser. A. P. 375-357.
5. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. М.: Иностранная литература, 1955. 272 с.
6. Клещев А.А., Ключин И.И. Об изгибных волнах в упругом круглом цилиндрическом стержне // Сб. научн. тр. Л.: ЛКИ, 1976. Вып. 109. С. 3-5.
7. Ключин И.И., Клещев А.А. Судовая акустика. Л.: Судостроение, 1982. 144 с.
8. Клещев А.А., Сургайло К.А. Фазовые скорости упругих волн в изотропном цилиндрическом стержне произвольной толщины. // Сб. тр. XI – ой сессии РАО. М.: ГЕОС, 2001. Т. 1. С. 236 – 238.
9. Ilmenkov S.L., Kleshchev A.A. The Debye's Potentials Utilisation in the Three – Dimensional Problems of the Radiation and Propagation of the Elastic Waves. // I. J. T. M. P. 2012. V. 2. № 6. P. 163 – 169.
10. Fan Y., Sinclair A.N., Honarvar F. Scattering of a plane acoustic wave from a transversely isotropic cylinder encased in a solid elastic medium // J. A. S. A. 1999. V. 106. N3. Pt.1.P. 1229-1236.
11. Клещев А.А. Потенциалы Дебая и «типа Дебая» в задачах дифракции, излучения и распространения упругих волн. // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 3. С. 338 – 341.
12. Cazis D C. Three-Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinder. // J.A.S.A. 1959. V. 31. N5. P. 568-578.
13. Kumar R. Dispersion of axially symmetric waves in Empty and fluid-filled Cylindrical shells. // Acustica. 1972. V. 27. N6. P. 317-329.
14. Kumar R., Stephens R.W.B. Dispersion of flexural waves in circular cylindrical shells. // Proc. Roy. Soc. London. A. 1972. V. 329. P. 283-297.
15. Ильменков С.Л., Клещев А.А. Фазовые скорости трехмерных изгибных волн в изотропной цилиндрической оболочке произвольной толщины (строгое решение). // Сб. трудов XI сессии РАО. 2001. Т. 1. М.: ГЕОС. С. 239-241.
16. Клещев А.А. Дифракция, излучение и распространение упругих волн. С-Пб.: Профпринт, 2006. 156 с.
17. Ilmenkov S.L., Kleshchev A.A. Phase Velocities of Three – Dimensional and Axis – Symmetrical Elastic Waves in Isotropic Cylindrical Shell. I. J. T. M. P. 2012. V. 2. № 6. P. 196 – 202.
18. Клещев А.А. Низкочастотное рассеяние импульсного звукового сигнала упругими цилиндрическими оболочками. // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 3. С. 381 – 386

## References

1. Achenbach J.D., Xu Y. Wave motion anisotropic elastic Layer generated by a timeharmonic point load of arbitrary direction. J. A. S. A. 1999. V. 106.N1. P.84-90.
2. Bancroft D. The velocity of longitudinal waves in cylindrical bars. // Phys. Rev. 1941. V. 59. N4. P. 588-593.
3. Hudson G.E. Dispersion of elastic waves in solid circular cylinders. // Phys. Rev. V. 63. N1. P. 46-51.
4. Davies R.M. Critical study of the Hopkinson pressure. Phil. Of the Royal Soc. of London. 1948. V. 240. Ser. A. P. 375-357.
5. Kol'skij G. Volny naprjazhenija v tverdyh telah. M.: Inostrannaja literatura, 1955. 272 s.
6. Kleshh'ov A.A., Kljukin I.I. Ob izgibnyh volnah v uprugom kruglom cilindricheskom sterzhne // Sb. nauchn. tr. L.: LKI, 1976. Vyp. 109. S. 3-5.
7. Kljukin I.I., Kleshh'ov A.A. Sudovaja akustika. L.: Sudostroenie, 1982. 144 s.
8. Kleshh'ov A.A., Surgajlo K.A. Fazovye skorosti uprugih voln v izotropnom cilindricheskom sterzhne proizvol'noj tolshhiny. Sb. tr. XI – oj sessii RAO. M.: GEOS, 2001. T. 1. S. 236 – 238.
9. Ilmenkov S.L., Kleshchev A.A. The Debye's Potentials Utilisation in the Three – Dimensional Problems of the Radiation and Propagation of the Elastic Waves. I. J. T. M. P. 2012. V. 2. № 6. P. 163 – 169.
10. Fan Y., Sinclair A.N., Honarvar F. Scattering of a plane acoustic wave from a transversely isotropic cylinder encased in a solid elastic medium J. A. S. A. 1999. V. 106. N3. Pt.1.P. 1229-1236.
11. Kleshh'ov A A. Potencialy Debaja i «tipa Debaja» v zadachah difrakcii, izluchenija i rasprostraneniya uprugih voln. // Akust. zhurn. 2012. T. 58. № 3. S. 338 – 341.
12. Cazis D C. Three-Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinder. J.A.S.A. 1959. V. 31. N5. P. 568-578.
13. Kumar R. Dispersion of axially symmetric waves in Empty and fluid-filled Cylindrical shells. Acustica. 1972. V. 27. N6. P. 317-329.
14. Kumar R., Stephens R.W.B. Dispersion of flexural waves in circular cylindrical shells. Proc. Roy. Soc. London. A. 1972. V. 329. P. 283-297.
15. Il'menkov S.L., Kleshh'ov A.A. Fazovye skorosti trehmernyh izgibnyh voln v izotropnoj cilin-driceskoj oblochke proizvol'noj tolshhiny (strogoe reshenie). Sb. trudov XI sessii RAO. 2001. T. 1. M.: GEOS. S. 239-241.
16. Kleshh'ov A.A. Difrakcija, izluchenie i rasprostranenie uprugih voln. S-Pb.: Profprint, 2006. 156 s.

17. Ilmenkov S.L., Kleshchev A.A. Phase Velocities of Three – Dimensional and Axis – Symmetrical Elastic Waves in Isotropic Cylindrical Shell. I. J. T. M. P. 2012. V. 2. № 6. P. 196 – 202.
18. Kleshhov A.A. Nizkochstotnoe rassejanie impul'snogo zvukovogo signala up-rugimi cilindricheski-mi obolochkami. Akust. zhurn. 2011. T. 57. № 3. S. 381 – 386.

УДК 532.5.01; УДК 629.7.036.5

## О КОРИОЛИСОВЫХ ЭФФЕКТАХ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПОТОКАХ ЖИДКОСТЕЙ

**Подольский Марлен Елизарович**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой деталей машин и подъемно-транспортных механизмов  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: pmet33@mail.ru

**Черенкова Светлана Валентиновна**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры деталей машин и подъемно-транспортных механизмов  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: svchpar@list.ru

**Иванова Марина Александровна**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры деталей машин и подъемно-транспортных механизмов  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: wosea@mail.ru

### Аннотация

В ранее выполненной работе было показано, что кориолисова составляющая момента сил, действующих на жидкость, прокачиваемую через вращающийся канал, равна сумме двух не только не одинаковых, но и принципиально отличающихся друг от друга слагаемых. Такой результат (он был получен на основе принципа Даламбера) представляется странным, поскольку, согласно известной формуле, векторы, которые в сумме дают кориолисово ускорение, друг другу равны. Выяснить, в чем здесь дело, тогда не удалось. Ответ на этот вопрос (использовался полевой подход Эйлера и аппарат прямого тензорного исчисления) дается в настоящей статье.

Показано, что «странное» слагаемое, отсутствующее в классическом турбинном уравнении Эйлера, – это не ошибка, а закономерное следствие изменения углового положения вектора момента относительной скорости вращающегося потока.

Что же касается обусловленного теми же причинами изменения углового положения вектора относительной скорости, а не ее момента, то оно приводит к появлению одной из двух равных друг другу составляющих кориолисова ускорения, чем и объясняется присутствие множителя 2 в формуле  $\vec{a}_c = 2\vec{\omega} \times \vec{w}$ .

**Ключевые слова:** вращающийся поток, момент кориолисовых сил инерции, подход Эйлера, производная по вектору.

## ON CORIOLIS EFFECTS IN ROTATING FLOWS OF LIQUIDS

**Podolsky Marlen Elizarovitch**

Professor, Dr.Sci.Tech.,  
Head of machine elements department  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: pmet33@mail.ru

**Cherenkova Svetlana Valentinovna**

Senior lecturer, Cand.Sci.Tech.,  
Senior lecturer of machine elements department  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: svchpar@list.ru

**Ivanova Marina Aleksandrovna**

Cand.Sci.Tech.,  
Senior lecturer of machine elements department

State marine technical university of Saint-Petersburg  
 Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
 e-mail: wosea@mail.ru

**Abstract**

In previous work it was shown that Coriolis component of the moment of forces acting on the liquid pumped through the rotating channel is equal to the sum of two items which are not only different one from another, but this difference is of fundamental importance. Such result appears to be very strange, because according to the well-known formula Coriolis acceleration is the sum of two components which are equal one to another. In our previous work we could not find the physical sense of such situation. We do it in the present work. It was been shown (Euler’s field approach and apparatus of direct tensor calculus were used) that the “strange” item which is absent in classical Euler’s turbine equation, – is not the error. It is the natural consequence of the relocation of the angular position of the moment of relative velocity of rotating flow.

As to the relocation of relative velocity vector (not the vector of inertia force moment) this factor leads to the second part of Coriolis acceleration and explains the coefficient 2 in formula  $\vec{a}_c = 2\vec{\omega} \times \vec{W}$ .

**Key words:** rotating flow, moment of Coriolis inertia forces, Euler’s approach, derivative with respect to vector.

**1. Подход Эйлера**

Суть этого подхода, в том виде, в котором он используется в настоящей работе, (см. также [2, 3]) состоит в следующем. Предположим, что в неподвижном пространстве задано стационарное поле некоторой величины, например, температуры, и что в этом пространстве движется частица, температура которой всякий раз равна температуре в той точке пространства, с которой она, в процессе своего движения, совпадает. Это означает, что температура  $T$  движущейся частицы есть функция ее положения в неподвижном пространстве, так что если  $\vec{r}$  – радиус-вектор точки в пространстве, то

$$T = T(\vec{r}). \tag{1.1}$$

Далее, для удобства изложения, поле искомой величины, задаваемое в неподвижном пространстве и используемое для изучения движущихся объектов, будем называть базовым. Примером такого поля является рассмотренное сейчас поле  $T = T(\vec{r})$ .

**2. Производная по вектору и ускорение точки равномерно вращающегося твердого тела**

Дифференциал  $d\vec{f}$  вектора  $\vec{f}(\vec{r})$  связан с дифференциалом  $d\vec{r}$  формулой<sup>\*)</sup>

$$d\vec{f} = d\vec{r} \cdot \frac{d\vec{f}}{d\vec{r}}, \tag{2.1}$$

где  $d\vec{f}/d\vec{r}$  – производная от  $\vec{f}$  по  $\vec{r}$ , а точкой обозначена операция скалярного умножения.

В одной и той же точке пространства можно выбрать бесчисленное множество векторов  $d\vec{r}$ , отличающихся друг от друга как по величине, так и по направлению. Обозначим через  $d\vec{r}_\omega$  дифференциал, отвечающий перемещению точки в ба-

зовом поле вектора  $\vec{f}$  в результате вращения тела. Соответствующий этому дифференциалу дифференциал  $d\vec{f}$ , согласно (2.1), определится формулой

$$d\vec{f} = d\vec{r}_\omega \cdot \frac{d\vec{f}}{d\vec{r}}. \tag{2.2}$$

Отсюда, после деления обеих частей на дифференциал времени  $dt$ , получим

$$\frac{d\vec{f}}{dt} = \frac{d\vec{r}_\omega}{dt} \cdot \frac{d\vec{f}}{d\vec{r}}. \tag{2.3}$$

Но

$$\frac{d\vec{r}_\omega}{dt} = \vec{u}, \tag{2.4}$$

где  $\vec{u}$  – окружная скорость, так что

$$\frac{d\vec{f}}{dt} = \vec{u} \cdot \frac{d\vec{f}}{d\vec{r}}. \tag{2.5}$$

Фигурирующая в (2.5) скорость  $\vec{u}$  определяется известной формулой ( $\vec{\omega}$  – угловая скорость тела)

$$\vec{u} = \vec{\omega} \times \vec{r}. \tag{2.6}$$

Если в качестве  $\vec{f}$  взять окружную скорость, то из (2.5) получим формулу для ускорения точки равномерно вращающегося тела:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{u}}{dt} \Rightarrow \vec{a} = \vec{u} \cdot \frac{d\vec{u}}{d\vec{r}}. \tag{2.7}$$

Дифференцируя (2.6) по  $\vec{r}$  (см. Приложение 2), с учетом постоянства  $\vec{\omega}$  получим

$$\frac{d\vec{u}}{d\vec{r}} = -\underline{\underline{E}} \times \vec{\omega}. \tag{2.8}$$

А так как

$$\vec{A} \cdot (\underline{\underline{E}} \times \vec{B}) = \vec{A} \times \vec{B}, \tag{2.9}$$

то формулы (2.7) и (2.8) приводят к формуле

$$\vec{u} \cdot \frac{d\vec{u}}{d\vec{r}} = \vec{u} \cdot (-\underline{\underline{E}} \times \vec{\omega}) = -\vec{u} \times \vec{\omega}, \tag{2.10}$$

откуда уже вытекает известная формула

$$\vec{a} = \vec{\omega} \times \vec{u}, \tag{2.11}$$

<sup>\*)</sup>Используется аппарат прямого тензорного исчисления (см. [4, 5] и Приложение 1).

определяющая нормальное ускорение точки, принадлежащей вращающемуся с угловой скоростью  $\vec{\omega}$  телу.

Эту же формулу можно получить, определяя  $\vec{u}$  по формуле (2.6), воспользовавшись (см. Приложение 3) общей формулой

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{u} \cdot \frac{d\vec{r}}{d\vec{r}} \Rightarrow \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{\omega} \times \vec{r}, \quad (2.12)$$

полностью соответствующей правилу дифференцирования по времени вращающегося вектора.

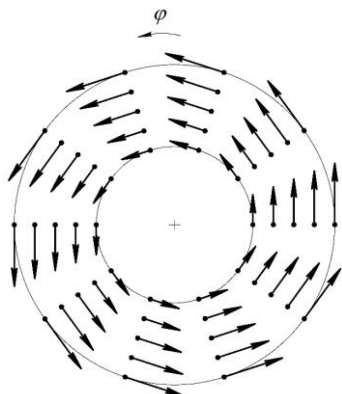
### 3. Сложное движение точки

Рассматривается движение точки, движущейся со скоростью  $\vec{w}$  по отношению к телу, вращающемуся с угловой скоростью  $\vec{\omega}$ . Абсолютная скорость точки  $\vec{v}$  определяется очевидной и хорошо известной формулой

$$\vec{v} = \vec{u} + \vec{w}, \quad (3.1)$$

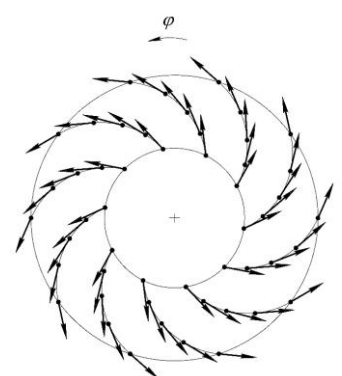
где  $\vec{u}$  – по формуле (2.6).

Базовое поле скорости  $\vec{v}$  – это суперпозиция полей  $\vec{u}$  (рис. 1) и  $\vec{w}$  (рис. 2).



$\vec{u} = \vec{u}(\vec{r})$

Рис. 1



$\vec{w} = \vec{w}(\vec{r})$

Рис. 2

Для абсолютного ускорения, в соответствии с подходом Эйлера и по аналогии с (2.7), имеем

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{v} \cdot \frac{d\vec{v}}{d\vec{r}} = (\vec{u} + \vec{w}) \cdot \left( \frac{d\vec{u}}{d\vec{r}} + \frac{d\vec{w}}{d\vec{r}} \right), \quad (3.2)$$

так что

$$\vec{a} = \vec{u} \cdot \frac{d\vec{u}}{d\vec{r}} + \vec{w} \cdot \frac{d\vec{w}}{d\vec{r}} + \vec{w} \cdot \frac{d\vec{u}}{d\vec{r}} + \vec{u} \cdot \frac{d\vec{w}}{d\vec{r}}. \quad (3.3)$$

Полагая в (3.3)  $\vec{w} = \vec{0}$ , получим для  $\vec{a}$  формулу (2.7) и точно так же при  $\vec{u} = \vec{0}$  имеем

$$\vec{a} = \vec{w} \cdot \frac{d\vec{w}}{d\vec{r}}. \quad (3.4)$$

Из способа получения этих формул следует, что первые два слагаемые в (3.3) – это соответственно переносное (если  $\vec{w} = \vec{0}$ ) и относительное (если  $\vec{u} = \vec{0}$ ) ускорения, а два последние должны определять кориолисово ускорение. Не останавливаясь пока на выводе соответствующих формул, выясним их физический (точнее, кинематический) смысл.

Начнем с третьего слагаемого. Умножая его на  $dt$  и имея в виду, что

$$\vec{w} dt = d\vec{r}_w, \quad (3.5)$$

где  $d\vec{r}_w$  – элементарное перемещение точки, движущейся со скоростью  $\vec{w}$ , получим

$$\left( \vec{w} \cdot \frac{d\vec{u}}{d\vec{r}} \right) dt = d\vec{r}_w \cdot \frac{d\vec{u}}{d\vec{r}}. \quad (3.6)$$

Сравнивая эту формулу с формулами (2.1) и (2.2), приходим к выводу, что формулой (3.6) определяется изменение окружной составляющей скорости в результате перемещения, обусловленного относительным движением по отношению к вращающемуся телу.

Поступая так же, как и при выводе (2.11), для третьего слагаемого формулы (3.3), с учетом (2.8), будем иметь

$$\vec{w} \cdot \frac{d\vec{u}}{d\vec{r}} = -\vec{w} \cdot (\underline{E} \times \vec{\omega}) = -\vec{w} \times \vec{\omega} = \vec{\omega} \times \vec{w}. \quad (3.7)$$

Для определения четвертого слагаемого в (3.3) воспользуемся уже применявшейся ранее формулой (2.12), определяющей скалярное произведение окружной скорости на производную по  $\vec{r}$  вектора, вращающегося вместе с вращающимся телом.

В результате приходим к формуле

$$\vec{u} \cdot \frac{d\vec{w}}{d\vec{r}} = \vec{\omega} \times \vec{w}, \quad (3.8)$$

которая, вместе с формулой (3.7), приводит к известной формуле для кориолисова ускорения

$$\vec{a}_c = 2\vec{\omega} \times \vec{w}. \quad (3.9)$$

### 4. Момент силы инерции точки, совершающей сложное движение

Взятый со знаком минус и отнесенный к единице массы, это момент определяется формулой

$$\vec{M}' = \vec{r} \times \vec{a}, \quad (4.1)$$

из которой, как известно, в силу формул

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}, \quad \vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}, \quad (4.2)$$

следует, что

$$\vec{M}' = \frac{d\vec{K}'}{dt}, \quad (4.3)$$

где

$$\vec{K}' = \vec{r} \times \vec{v} - \tag{4.4}$$

отнесенный к единице массы кинетический момент точки.

Отсюда, определяя, как и при выводе (3.2) и (3.3) производную по времени формулой

$$\frac{d}{dt} = \vec{v} \cdot \frac{d}{d\vec{r}}, \tag{4.5}$$

получим

$$\vec{M}' = \vec{v} \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{v}), \tag{4.6}$$

и

$$\begin{aligned} \vec{M}' = & \vec{u} \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{u}) + \vec{w} \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{w}) + \\ & + \vec{w} \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{u}) + \vec{u} \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{w}). \end{aligned} \tag{4.7}$$

По своему физическому смыслу формула (4.7)<sup>\*</sup> аналогична формуле (3.3): первое слагаемое определяет момент, обусловленный переносным движением, второе – относительным, два последних учитывают влияние кориолисовых эффектов.

Формулу (4.7) можно преобразовать. Применяя к первому и последнему слагаемым этой формулы формулу (2.12) и принимая во внимание (3.1), для  $\vec{M}'$  получим

$$\vec{M}' = \vec{\omega} \times (\vec{r} \times \vec{u}) + \vec{w} \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{v}) + \vec{\omega} \times (\vec{r} \times \vec{w}). \tag{4.8}$$

### 5. Вращающаяся элементарная струйка

По существу, именно такая модель использовалась для вывода классического уравнения Эйлера Прандтлем [6]. Так как вектор  $\vec{M}'$  – это момент, отнесенный к единице массы, то момент сил, действующих на струйку, определяется интегралом ( $\rho$  – плотность,  $V$  – объем струйки)

$$\vec{M} = \int_m \vec{M}' dm = \int_V \vec{M}' \rho dV. \tag{5.1}$$

Составляющая вектора  $\vec{M}$ , отвечающая первому слагаемому формулы (4.8), записывается, с учетом (2.6), в виде

$$\vec{M}_1 = \int_V \vec{\omega} \times [\vec{r} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})] \rho dV \tag{5.2}$$

и, так же, как и в [1], может быть найдена по формуле

$$\vec{M}_1 = -\vec{\omega} \cdot \underline{\underline{J}} \times \vec{\omega}, \tag{5.3}$$

где

$$\underline{\underline{J}} = \int_V (\underline{\underline{E}} r^2 - \vec{r} \otimes \vec{r}) \rho dV. \tag{5.4}$$

Физический смысл момента  $\vec{M}_1$  в формуле (5.3) – взятый со знаком «минус» момент сил инерции твердого тела (с плотностью  $\rho$ ) в объеме струйки  $V$ .

Для вычисления интегралов от второго и третьего слагаемых формулы (4.8) представим вектор  $\vec{w}$  в виде

$$\vec{w} = w \vec{w}^\circ, \tag{5.5}$$

где  $\vec{w}^\circ$  – орт оси струйки, а  $w$  – средняя скорость жидкости в струйке. С расходом  $G$  и живым сечением струйки  $S$  скорость  $w$  связана очевидной формулой

$$\rho w S = G. \tag{5.6}$$

А так как масса элементарного отрезка струйки длиной  $dl$  и элементарный объем  $dV$  определяются формулами

$$dm = \rho S dl \text{ и } dV = S dl, \tag{5.7}$$

то для интеграла от третьего слагаемого формулы (4.8), с учетом независимости  $\vec{\omega}$  и  $G$  от  $l$ , получим

$$\vec{M}_3 = G \vec{\omega} \times \int_l \vec{r} \times \vec{w}^\circ dl. \tag{5.8}$$

Точно так же преобразуется и второе слагаемое:

$$\vec{M}_2 = G \int_l \vec{w}^\circ \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{v}) dl. \tag{5.9}$$

Введем в рассмотрение вектор

$$\vec{A} = \vec{r} \times \vec{v}. \tag{5.10}$$

Вектор  $\vec{A}$  есть функция  $\vec{r}$ . Следовательно, так же, как и скалярные произведения в формулах (2.1) и (3.2), подинтегральное выражение в (5.9) – это дифференциал  $d\vec{A}$ , обусловленный перемещением частицы жидкости струйки вдоль  $\vec{w}^\circ$  на величину  $dl$ .

Поэтому

$$\int_l \vec{w}^\circ \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{v}) dl = \int_{\vec{A}_1}^{\vec{A}_2} d\vec{A} = \vec{A}(\vec{r}_2) - \vec{A}(\vec{r}_1) \tag{5.11}$$

и, следовательно,

$$\vec{M}_2 = G (\vec{r}_2 \times \vec{v}_2 - \vec{r}_1 \times \vec{v}_1), \tag{5.12}$$

что, с учетом (3.1), можно записать и так

$$\vec{M}_2 = G (\vec{r}_2 \times \vec{w}_2 - \vec{r}_1 \times \vec{w}_1) + G (\vec{r}_2 \times \vec{u}_2 - \vec{r}_1 \times \vec{u}_1). \tag{5.13}$$

### 6. Вращающийся поток жидкости

Рассматривая поток как совокупность струек [7], для суммарного момента действующих на него сил, пользуясь формулой (4.7), получим

$$\begin{aligned} \vec{M} = & \rho \int_V \vec{u} \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{u}) dV + \\ & + \rho \int_V \vec{w} \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{w}) dV + \vec{M}_c. \end{aligned} \tag{6.1}$$

Здесь  $\vec{M}_c$  – взятый со знаком «минус» момент кориолисовых сил инерции. Он определяется формулой

$$\vec{M}_c = \vec{M}_w + \vec{M}_u, \tag{6.2}$$

где

$$\vec{M}_w = \rho \int_V \vec{w} \cdot \frac{d(\vec{r} \times \vec{u})}{d\vec{r}} dV, \tag{6.3}$$

<sup>\*</sup> Еще один вывод этой формулы, без привлечения понятия о кинетическом моменте, см. Приложение 4.

$$\vec{M}_u = \rho \int_V \vec{u} \cdot \frac{d(\vec{r} \times \vec{w})}{d\vec{r}} dV. \quad (6.4)$$

Воспользуемся теперь тем обстоятельством, что, по определению производной от вектора по вектору [5],

$$\frac{d\vec{f}}{d\vec{r}} = \vec{\nabla} \otimes \vec{f} \quad (6.5)$$

и учтем, что (см. Приложение 5)

$$\vec{a} \cdot (\vec{\nabla} \otimes \vec{b}) = \vec{\nabla} \cdot (\vec{a} \otimes \vec{b}) - (\vec{\nabla} \cdot \vec{a}) \vec{b}. \quad (6.6)$$

Имея еще в виду, что, согласно (2.6),

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0, \quad (6.7)$$

и, в силу закона сохранения массы,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{w} = 0, \quad (6.8)$$

подинтегральные выражения в формулах (6.1), (6.3) и (6.4) преобразуем к виду

$$\vec{u} \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{u}) = \vec{\nabla} \cdot [\vec{u} \otimes (\vec{r} \times \vec{u})], \quad (6.9)$$

$$\vec{w} \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{w}) = \vec{\nabla} \cdot [\vec{w} \otimes (\vec{r} \times \vec{w})], \quad (6.10)$$

$$\vec{w} \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{u}) = \vec{\nabla} \cdot [\vec{w} \otimes (\vec{r} \times \vec{u})], \quad (6.11)$$

$$\vec{u} \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{w}) = \vec{\nabla} \cdot [\vec{u} \otimes (\vec{r} \times \vec{w})]. \quad (6.12)$$

Пользуясь формулами (6.9) и (6.12), объемные интегралы в (6.1), (6.3) и (6.4), можно преобразовать к виду, допускающему применение формы Гаусса-Остроградского. Тензорный аналог этой формулы применительно, например, к диаде  $\vec{a} \otimes \vec{b}$  может быть записан в виде [5]

$$\int_V \vec{\nabla} \cdot (\vec{a} \otimes \vec{b}) dV = \oint_S \vec{n} \cdot (\vec{a} \otimes \vec{b}) dS, \quad (6.13)$$

где  $\vec{n}$  – орт внешней нормали к  $S$ .

Поэтому, в силу тождества

$$\vec{a} \cdot (\vec{b} \otimes \vec{c}) = (\vec{a} \cdot \vec{b}) \vec{c}, \quad (6.14)$$

для объемного интеграла в (6.13) имеем

$$\int_V \vec{\nabla} \cdot (\vec{a} \otimes \vec{b}) dV = \oint_S a_n \vec{b} dS, \quad (6.15)$$

где

$$a_n = \vec{n} \cdot \vec{a} - \quad (6.16)$$

скалярная проекция вектора  $\vec{a}$  на орт  $\vec{n}$ .

С учетом (6.13) и формул (6.9) – (6.12), вместо (6.1) – (6.4), получим

$$\vec{M} = \rho \left[ \oint_S (\vec{r} \times \vec{u}) u_n dS + \oint_S (\vec{r} \times \vec{w}) w_n dS \right] + \vec{M}_c, \quad (6.17)$$

где  $\vec{M}_c$  по формуле (6.2), в которой

$$\vec{M}_w = \oint_S (\vec{r} \times \vec{u}) \rho w_n dS, \quad (6.18)$$

$$\vec{M}_u = \oint_S (\vec{r} \times \vec{w}) \rho u_n dS. \quad (6.19)$$

Первое слагаемое в формуле (6.17) – это еще одна (в некоторых случаях более удобная) форма записи формулы для твердотельной составляющей суммарного момента (см. выше (5.3) и формулу (1.11) в [1]).

Второе слагаемое в (6.17) определяет конвективную составляющую момента. В предположении, что на боковых поверхностях потока  $w_n = 0$ , она находится по формуле\*)

$$\oint_S (\vec{r} \times \vec{w}) \rho w_n dS = G(\vec{r}_2 \times \vec{w}_2 - \vec{r}_1 \times \vec{w}_1), \quad (6.20)$$

где  $G$  – расход потока.

Аналогичным образом находится и момент  $\vec{M}_w$

$$\vec{M}_w = G(\vec{r}_2 \times \vec{u}_2 - \vec{r}_1 \times \vec{u}_1). \quad (6.21)$$

Что же касается формулы (6.19), то она неверна. Для того чтобы в этом убедиться, рассмотрим модельную задачу по схеме на рис. 3. Здесь круглоцилиндрический канал, через который прокачивается жидкость, вращается вокруг оси  $Ox_3$  с угловой скоростью

$$\vec{\omega} = \omega \vec{e}_3. \quad (6.22)$$

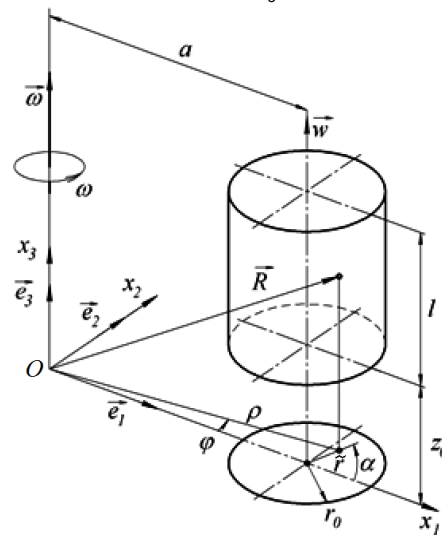


Рис. 3

Ось канала параллельна оси  $Ox_3$  и отстоит от нее на расстоянии  $a$ . Внутренний радиус канала равен  $r_0$ . Радиус-вектор точки внутри канала определяется формулой

$$\vec{r} = (a + \tilde{r} \cos \alpha) \vec{e}_1 + \tilde{r} \sin \alpha \vec{e}_2 + x_3 \vec{e}_3. \quad (6.23)$$

Если жидкость прилипает к стенкам канала, т.е. если  $w(\tilde{r} = r_0) = 0$ , то интеграл в правой части формулы (6.19), вычисляемый по боковой части поверхности  $S$ , равен нулю. Но в нуль обращается и интеграл на торцевых поверхностях цилиндра (на этих поверхностях  $u_n = 0$ ). А это уже означает, что интеграл по поверхности в формуле (6.19) равен нулю.

Между тем, как будет показано ниже, объемный интеграл в той же самой формуле (6.19) ну-

\*) Так же, как в (5.12) и (5.13), задача решается в гидравлическом приближении, т.е. путем осреднения  $\vec{r} \times \vec{w}$  по поперечному сечению потока.



лю не равен, и, следовательно, формула (6.19) действительно неверна.

С математической точки зрения несовпадение правой и левой частей формулы (6.19) объясняется просто: условия применимости формулы Гаусса-Остроградского [8] оказались невыполненными (скорость  $w$ , а вместе с ней и функции, которыми определяется произведение  $\vec{u} \otimes (\vec{r} \times \vec{w})$ , на границе  $\vec{r} = r_0$  терпит разрыв). таким образом, задача о моменте  $\vec{M}_u$  оказалась примером нарушения условий применимости формулы Гауса-Остроградского не в абстрактно-математической, а в прикладной задаче.

Что касается вычисления  $\vec{M}_u$ , то для этого, как следует из вывода соответствующей формулы (см. (6.4)), нужно будет использовать объемный интеграл (физический смысл этого результата см. ниже).

Проще всего его можно найти с помощью формулы (2.12). Полагая в ней

$$\vec{f} = \vec{r} \times \vec{w}, \quad (6.24)$$

из (6.4) получим формулу

$$\vec{M}_u = \rho \int_V \vec{\omega} \times (\vec{r} \times \vec{w}) dV, \quad (6.25)$$

которая полностью совпадает с формулой для второго слагаемого формулы (1.14) из [1].

Используем (6.25) для анализа схемы на рис. 3. Предполагая, что режим движения жидкости в канале ламинарный, примем [9]

$$\vec{w} = w \vec{e}_3, \quad w = 2w_m (1 - \xi^2), \quad \xi = \vec{r} / r_0. \quad (6.26)$$

Тогда из (6.25), с учетом (2.6), (6.22) и (6.23), получим

$$\vec{M}_u = \omega G a l \vec{e}_1, \quad G = \pi \rho r_0^2 w_m. \quad (6.27)$$

Здесь  $w_m$  и  $G$  – средняя скорость и расход жидкости через канал.

К формуле (6.27) приводит и формула (6.4). Решая задачу в гидравлическом приближении, примем

$$w = w_m = \text{const} \neq f(\vec{r}). \quad (6.28)$$

Т. к. в силу (6.28) и (6.26),  $\vec{w} = \text{const}$ , то

$$\vec{u} \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{w}) = \vec{u} \cdot (\underline{E} \times \vec{w}) = \vec{u} \times \vec{w}. \quad (6.29)$$

Поэтому (см. (2.6), (6.23) и (6.26))

$$\begin{aligned} \vec{u} \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{u} \times \vec{w}) &= \\ &= \omega w_m [(a + \vec{r} \cos \alpha) \vec{e}_1 + \vec{r} \sin \alpha \vec{e}_2]. \end{aligned} \quad (6.30)$$

После подстановки (6.30) в (6.4) снова получаем (6.27), и, таким образом, еще раз убеждаемся, что равный нулю поверхностный интеграл в формуле (6.19) для  $\vec{M}_u$  объемному интегралу (6.4) не равен.

Вместе с тем интегралы (6.18) и (6.3), определяющие Эйлеровскую составляющую момента, друг другу равны и применительно к примеру на рис.3 определяются формулой

$$\vec{M}_w = -\omega G a l \vec{e}_1, \quad (6.31)$$

которая отличается от (6.27) только знаком.

Ничего удивительного в таком совпадении по модулю с (6.27) нет: суммарный момент кориолисовых сил инерции в условиях схемы на рис. 3 должен равняться нулю, поскольку линии действия векторов  $\vec{\omega}$  и  $\vec{w}$  совпадают.

Таким образом, полученные сейчас решения подтверждают правильность выбранной расчетной схемы. Кроме того, они дают и ответ на вопрос о том, какой из фигурирующих в формулах (6.19) и (6.4) интеграл – поверхностный или объемный – нужно использовать для определения  $\vec{M}_w$ . Из сопоставления значений моментов  $\vec{M}_w$  и  $\vec{M}_u$  следует, что это должен быть объемный интеграл.

К такому же выводу приводит и анализ физического смысла задачи: динамическое воздействие жидкости на стенки ограничивающего ее движение канала определяется не локальными характеристиками потока, а его движением в целом (отсюда и величины  $G$  и  $\vec{\omega}$ , например, в формулах (5.8), (6.27) и (6.31)).

### Заключение

Как и в [1], но на другой методической основе, рассматривалась задача об основном уравнении теории турбомашин в пространственной постановке. Подтверждены ранее полученные результаты. Выяснены их физический и математический смысл. Показано, что составляющая момента кориолисовых сил инерции, отсутствующая в классическом уравнении Эйлера, обусловлена изменением углового положения потока в пространстве. Введено в рассмотрение понятие о базовом поле вращения и показано, что традиционная для полевых задач формула Гаусса-Остроградского может быть использована для получения только классической (эйлеровской) части турбинного уравнения, а к его существенно пространственной части она неприменима, поскольку в этом случае условия, обеспечивающие справедливость формулы Гаусса-Остроградского, не выполняются. Тем самым было показано, что не только в абстрактно теоретических, но и в прикладных задачах возможны такие ситуации, когда не выполняются условия, обеспечивающие применимость хорошо известных теорем.

Результаты, полученные в статье, иллюстрируют целесообразность использования методов тензорного исчисления для решения прикладных задач. В том виде, в котором они были использованы выше, они позволяют существенно упростить процесс решения и обеспечивают физическую прозрачность результатов. С этой точки зрения интерес может представить работа [10], в которой предложена новая, и, как показывает опыт, легко воспринимаемая на интуитивном уровне трактовка основных понятий прямого тензорного исчисления.

В настоящее время планируется дальнейшее развитие этой работы (ориентировочное назва-

ние «Физика, геометрия и математика тензора») и исправление опечаток и неточностей, замеченных в предыдущих публикациях.

**Приложение 1**

**Краткие сведения из векторного и тензорного исчисления [4, 5]**

$$\begin{aligned} \vec{f} &= f_i \vec{e}_i, \quad \underline{\underline{\alpha}} = \alpha_{ij} \vec{e}_i \otimes \vec{e}_j, \\ \vec{a} \cdot \underline{\underline{E}} &= \underline{\underline{E}} \cdot \vec{a} = \vec{a}, \quad \underline{\underline{E}} = \vec{e}_i \otimes \vec{e}_i; \\ \vec{a} \cdot (\vec{b} \otimes \vec{c}) &= (\vec{a} \cdot \vec{b}) \vec{c}; \\ \frac{d\vec{f}}{d\vec{r}} &= \vec{\nabla} \otimes \vec{f}; \quad \frac{d(\vec{a} \times \vec{b})}{d\vec{r}} = \frac{d\vec{a}}{d\vec{r}} \times \vec{b} - \frac{d\vec{b}}{d\vec{r}} \times \vec{a}; \\ \vec{v} \cdot \frac{d\vec{v}}{d\vec{r}} &= \vec{v} \cdot (\vec{\nabla} \otimes \vec{v}) = (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v}. \end{aligned}$$

Формула Гаусса-Остроградского

$$\int_V \vec{\nabla} \cdot \underline{\underline{\alpha}} dV = \oint_S \vec{n} \cdot \underline{\underline{\alpha}} dS;$$

$\vec{f}, \vec{A}, \dots$  – векторы;  
 $\underline{\underline{\alpha}}$  – тензор,  $\underline{\underline{E}}$  – единичный тензор;  
 $\cdot$  – знак скалярного умножения;  
 $\times$  – знак векторного умножения;  
 $\otimes$  – знак тензорного умножения.

**Приложение 2**

**Формула 2.8**

Пользуясь правилом дифференцирования по вектору векторного произведения векторов (см. Приложение 1), из (2.6) получим

$$\frac{d\vec{u}}{d\vec{r}} = \frac{d\vec{\omega}}{d\vec{r}} \times \vec{r} - \frac{d\vec{r}}{d\vec{r}} \times \vec{\omega}.$$

Но  $\vec{\omega}$  от  $\vec{r}$  не зависит, а производная  $d\vec{r}/d\vec{r}$  равна единичному тензору  $\underline{\underline{E}}$ , следовательно,

$$\frac{d\vec{u}}{d\vec{r}} = -\underline{\underline{E}} \times \vec{\omega}.$$

**Приложение 3**

**Формула 2.12**

Рассмотрим векторное поле  $\vec{f}(\vec{r})$  и запишем его в цилиндрической системе координат. Используя общепринятые обозначения (см. также [2, 3]), получим

$$\vec{f} = f_\rho \vec{e}_\rho + f_\varphi \vec{e}_\varphi + f_z \vec{e}_z. \quad (П3.1)$$

Поле  $\vec{f}$  будем называть полем вращения, если все его компоненты не зависят от угловой координаты  $\varphi$ . Независимость  $f_\rho$ ,  $f_\varphi$  и  $f_z$  от  $\varphi$  означает, что с геометрической точки зрения вращение вокруг осевой координатной оси  $\vec{e}_z$  преобразует поле в само себя. Примерами полей вращения являются поля на рис. 1 и 2.

Обратимся теперь к формуле (2.5). Предварительно заметим, что если тело вращается вокруг

неподвижной оси с ортом  $\vec{e}_z$ , то окружная скорость на радиусе  $|\vec{r}| = \rho$  будет равна

$$\vec{u} = \omega \rho \vec{e}_\varphi. \quad (П3.2)$$

где

$$\vec{\omega} = \omega \vec{e}_z - \quad (П3.3)$$

угловая скорость.

Имея в виду, что  $(\vec{\nabla} - \text{оператор Гамильтона})$

$$\frac{d\vec{f}}{d\vec{r}} = \vec{\nabla} \otimes \vec{f} = \left[ \vec{e}_\rho \frac{\partial}{\partial \rho} + \vec{e}_\varphi \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \vec{e}_z \frac{\partial}{\partial z} \right] \otimes \vec{f}, \quad (П3.4)$$

и принимая во внимание тождество

$$\vec{a} \cdot (\vec{b} \otimes \vec{c}) = (\vec{a} \cdot \vec{b}) \vec{c}, \quad (П3.5)$$

получим (с учетом (П3.2) и взаимной ортогональности векторов  $\vec{e}_\rho$ ,  $\vec{e}_\varphi$  и  $\vec{e}_z$ )

$$\vec{u} \cdot \frac{d\vec{f}}{d\vec{r}} = \omega \rho \left( \vec{e}_\varphi \cdot \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \varphi} \vec{e}_\varphi \right) \vec{f} = \omega \frac{\partial \vec{f}}{\partial \varphi}. \quad (П3.6)$$

Если поле  $\vec{f}(\vec{r})$  – поле вращения, то

$$\frac{\partial f_\rho}{\partial \varphi} = 0, \quad \frac{\partial f_\varphi}{\partial \varphi} = 0, \quad \frac{\partial f_z}{\partial \varphi} = 0, \quad (П3.7)$$

и, следовательно (см. (П3.1) и (П3.6)),

$$\vec{u} \cdot \frac{d\vec{f}}{d\vec{r}} = \omega \left( f_\rho \frac{\partial \vec{e}_\rho}{\partial \varphi} + f_\varphi \frac{\partial \vec{e}_\varphi}{\partial \varphi} + f_z \frac{\partial \vec{e}_z}{\partial \varphi} \right). \quad (П3.8)$$

А так как (см., например, [2] и [3])

$$\frac{\partial \vec{e}_\rho}{\partial \varphi} = \vec{e}_z \times \vec{e}_\rho, \quad \frac{\partial \vec{e}_\varphi}{\partial \varphi} = \vec{e}_z \times \vec{e}_\varphi, \quad \frac{\partial \vec{e}_z}{\partial \varphi} = \vec{e}_z \times \vec{e}_z, \quad (П3.9)$$

то, с учетом (П3.3), формула (П3.6) приводит к формуле

$$\vec{u} \cdot \frac{d\vec{f}}{d\vec{r}} = \vec{\omega} \times \vec{f}, \quad (П3.10)$$

а это и есть формула (2.12).

Следует подчеркнуть, что, как это видно из ее вывода, формула (2.12) справедлива, если поле  $\vec{f}(\vec{r})$  – поле вращения.

**Приложение 4**

**Момент силы инерции точки**

В п. 4 момент силы инерции точки определялся на основе понятия о кинетическом моменте. Поскольку при таком подходе сила инерции в явном виде не рассматривалась, во избежание возможных сомнений в правомерности такого метода решения задачи, дается еще одно решение, основанное на непосредственном определении момента вектора ускорения.

Из (4.1) и (3.2) имеем

$$\vec{M}' = \vec{r} \times \left( \vec{v} \cdot \frac{d\vec{v}}{d\vec{r}} \right). \quad (П4.1)$$

С учетом тождества

$$\vec{a} \cdot (\vec{b} \otimes \vec{c}) = (\vec{a} \cdot \vec{b}) \vec{c} \quad (П4.2)$$

и принимая во внимание, что

$$\frac{d\vec{f}}{d\vec{r}} = \vec{\nabla} \otimes \vec{f}, \quad (П4.3)$$

для правой части формулы (П4.1) будем иметь

$$\begin{aligned} \vec{r} \times \left( \vec{v} \cdot \frac{d\vec{v}}{d\vec{r}} \right) &= \vec{r} \times \left( \vec{v} \cdot \underbrace{\vec{\nabla} \otimes \vec{v}} \right) = \vec{r} \times \left[ \underbrace{(\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v}} \right] = \\ &= \underbrace{(\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) (\vec{r} \times \vec{v})} = \vec{v} \cdot \left[ \underbrace{\vec{\nabla} \otimes (\vec{r} \times \vec{v})} \right] = \vec{v} \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{v}). \end{aligned} \quad (П4.4)$$

В формулах (П4.4) дифференцируется только  $\vec{v}$ . Если же учитывается возможность изменения и  $\vec{r}$ , то соответствующая производная определится формулой

$$\frac{d(\vec{r} \times \vec{v})}{d\vec{r}} = \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{v}) + \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{v}). \quad (П4.5)$$

Так как

$$\frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{v}) = \frac{d\vec{r}}{d\vec{r}} \times \vec{v} = \underline{\underline{E}} \times \vec{v}, \quad (П4.6)$$

то из (П4.5), с учетом (П4.6), получим

$$\frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{v}) = \frac{d(\vec{r} \times \vec{v})}{d\vec{r}} - \underline{\underline{E}} \times \vec{v}. \quad (П4.7)$$

Отсюда, имея в виду, что

$$\vec{v} \cdot (\underline{\underline{E}} \times \vec{v}) = \vec{v} \times \vec{v} = \vec{0}, \quad (П4.8)$$

и умножив  $\vec{v}$  скалярно на обе части (П4.7) приходим к формуле для выражения в правой части (П4.4):

$$\vec{v} \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{v}) = \vec{v} \cdot \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{v}), \quad (П4.9)$$

откуда уже (см. (П4.4) и (П4.1)) вытекает формула для  $\vec{M}'$ , полностью совпадающая с формулой (4.6) для  $\vec{M}'$  в п. 4.

**Приложение 5**  
**Формула 6.6**

Так как  $\vec{\nabla}$  – это оператор дифференцирования, и операция  $\otimes$  – операция умножения, то

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{a} \otimes \vec{b}) = \vec{\nabla} \cdot (\vec{a} \otimes \vec{b}) + \vec{\nabla} \cdot (\vec{a} \otimes \vec{b}). \quad (П5.1)$$

В силу тождества

$$\vec{A} \cdot (\vec{B} \otimes \vec{C}) = (\vec{A} \cdot \vec{B}) \vec{C} \quad (П5.2)$$

и коммутативности скалярного произведения векторов, имеем

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{a} \otimes \vec{b}) = (\vec{\nabla} \cdot \vec{a}) \vec{b} \quad (П5.3)$$

и

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{a} \otimes \vec{b}) = (\vec{\nabla} \cdot \vec{a}) \vec{b} = (\vec{a} \cdot \vec{\nabla}) \vec{b} = \vec{a} \cdot (\vec{\nabla} \otimes \vec{b}). \quad (П5.4)$$

Подставив (П5.3) и (П5.4) в (П5.1), приходим к формуле

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{a} \otimes \vec{b}) = (\vec{\nabla} \cdot \vec{a}) \vec{b} + \vec{a} \cdot (\vec{\nabla} \otimes \vec{b}), \quad (П5.5)$$

откуда и вытекает искомая формула (6.6)

$$\vec{a} \cdot (\vec{\nabla} \otimes \vec{b}) = \vec{\nabla} \cdot (\vec{a} \otimes \vec{b}) - (\vec{\nabla} \cdot \vec{a}) \vec{b}. \quad (П5.6)$$

**Литература**

1. Подольский М.Е., Черенкова С.В., Иванова М.А. Основное уравнение теории турбин и лопастных машин в пространственной постановке // Морские интеллектуальные технологии. № 2 (32) Т.1 2016. С. 95-101.
2. Подольский М.Е. О методе Эйлера в применении к кинематике и динамике твердого тела // Теория механизмов и машин. СПб, 2013. Т. 11. № 2 (22). С. 38–45.
3. Podolsky M.E. Field description of rotational motion. Proc. of XLI Summer School-Conference "Advanced Problems in Mechanics". St. Peterburg, 2013. P. 431–437.
4. Подольский М.Е. Тензорное исчисление. Элементарные трактовки и примеры практических приложений // Морской вестник. № 4 (48). 2013. С. 97-100.
5. Подольский М.Е. Физико-механические основы и некоторые инженерные приложения прямого тензорного исчисления. СПб: Изд-во СПбГМТУ; 2011. 466 с.
6. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Перевод с немецкого. М.: Изд-во ИЛ, 1951. 575 с.
7. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. Книга 1. М.: Энергоатомиздат, 1991. 350 с.
8. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления (в 3-х томах). Т. 3. М.: ГИФМЛ, 1960. 655 с.
9. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Часть 2. М.: Физматгиз, 1963. 728 с.
10. Подольский М.Е., Черенкова С.В. Инженерно ориентированные методы тензорного анализа и задачи гидравлики // Сб. науч тр. МНТК 9-10 июня 2016 года «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития». СПб: Изд-во Политехнического университета, 2016. С. 241-248.

**References**

1. Podol'skij M.E., Cherenkova S.V., Ivanova M.A. Osnovnoe uravnenie teorii turbin i lopastnyh mashin v prostanstvennoj postanovke // Morskie intellektual'nye tehnologii. № 2 (32) Т.1 2016. S. 95-101.
2. Podol'skij M.E. O metode JEйлера v primenenii k kinematike i dinamike tverdogo tela // Teorija mehanizmov i mashin. SPb, 2013. T. 11. № 2 (22). S. 38–45.
3. Podolsky M.E. Field description of rotational motion. Proc. of XLI Summer School-Conference "Advanced Problems in Mechanics". St. Peterburg, 2013. P. 431–437.
4. Podol'skij M.E. Tenzornoe ischislenie. JEelementarnye traktovki i primery prakticheskikh prilozhenij // Morskoy vestnik. № 4 (48). 2013. S. 97-100.

5. Podol'skij M.E. Fiziko-mehaničeskie osnovy i nekotorye inženernye prilozhenija prjamogo tenzornogo isčislenija. SPb: Izd-vo SPbGMTU; 2011. 466 s.
6. Prandtl' L. Gidroaeromehanika. Perevod s nemeckogo. M.: Izd-vo IL, 1951. 575 s.
7. SHterenliht D.V. Gidravlika. Kniga 1. M.: JEnergoatomizdat, 1991. 350 s.
8. Fihthengol'c G.M. Kurs differencial'nogo i integral'nogo isčislenija (v 3-h tomah). T. 3. M.: GIFML, 1960. 655 s.
9. Kochin N.E., Kibel' I.A., Roze N.V. Teoretičeskaja gidromehanika. CHast' 2. M.: Fizmatgiz, 1963. 728 s.
10. Podol'skij M.E., CHerenkova S.V. Inženerno orientirovannye metody tenzornogo analiza i zadachi gidravliki // Sb. nauch tr. MNTK 9-10 ijunja 2016 goda «Gidravličeskie mashiny, gidropnevmoprivody i gidropnevmoavtomatika. Sovremennoe sostojanie i perspektivy razvitija». SPb: Izd-vo Politehnicheskogo universiteta, 2016. S. 241-248.

УДК 629.12.073.243.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ СУДАМИ НА ЗНАЧЕНИЯ УСКОРЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ СОВМЕСТНОЙ КАЧКЕ 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, 10  
e-mail: sem\_viktorial@mail.ru

**Аунг Мьо Тхант**

аспирант  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10  
e-mail: aungmyothant.amt@mail.ru

### Аннотация

В статье рассматривается определение ускорений, возникающих в произвольных точках судов при их совместной качке в условиях мелководья на регулярном волнении на основании ранее полученного решения системы 12 связанных дифференциальных уравнений качки. Особое внимание уделяется исследованию влияния изменения расстояния между различными судами при их параллельном расположении на амплитуды ускорений, имеющих место при различных курсовых углах. Определение ускорений проводилось в точках на борту и на носовом перпендикуляре каждого судна. Анализ полученных результатов показывает увеличение значений продольных, поперечных и вертикальных составляющих ускорения при расположении судов параллельно друг другу при уменьшении расстояния между ними. Показано влияние гидродинамического взаимодействия при качке на встречном волнении, проявляющееся в появлении поперечных составляющих ускорения, отсутствующих при качке изолированного судна. Данные составляющие имеют значения, соизмеримые с вертикальными составляющими ускорения. Делается вывод о необходимости учета изменения расстояния между судами при определении ускорений в различных точках обоих судов при их расположении параллельно друг другу.

**Ключевые слова:** кинематические характеристики качки, ускорения, мелководье, совместная качка, дифференциальные уравнения, амплитудные значения, гидродинамическое взаимодействие, регулярное волнение.

## STUDY OF THE INFLUENCE OF THE VARIATION OF DISTANCE BETWEEN THE SHIPS ON THE ACCELERATION VALUES DURING THEIR COUPLED MOTIONS 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  
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  
e-mail: aungmyothant.amt@mail.ru

### Abstract

This paper deals with the determination of the accelerations that occur at arbitrary points of ships during their coupled motions in shallow water, based on the previous solution of a system of 12 coupled differential equations. Special consideration is given to the investigation of the influence of the variation of distance between the ships, floating side-by-side on the amplitudes of accelerations that occur at different incident wave angles. Determination of the components of acceleration was conducted at points on the board and at the forward perpendicular of each ship. Analysis of the results shows increased values of longitudinal, transverse and vertical accelerations at the

location of ships side by side with decreasing distance between them. The paper shows the influence of the hydrodynamic interaction during the motions at head waves, manifested in the appearance of transverse acceleration components missing at motions of an isolated ship. These elements have values commensurate with the vertical acceleration components. The conclusion about the need to consider changes in the distance between the ships in determining the accelerations at various points of the two ships arranged side by side is made.

**Key words:** kinematic characteristics of motions, accelerations, shallow water, the coupled motions of ship, differential equations, the amplitude values, hydrodynamic interaction, regular waves

**Введение**

Одной из важнейших прикладных задач при построении методов расчета совместной качки двух судов является определение соответствующих кинематических характеристик, а именно скоростей и ускорений в произвольных точках судов. Определение ускорений необходимо при решении таких задач, как передача груза с одного судна на другое, разработка методов снабжения судов топливом, оценка возможности швартовки судов в условиях волнения.

Ранее, в работе [ 4 ] было рассмотрено определение ускорений, возникающих в случае качки одного судна в условиях мелководного фарватера и показано значительное влияние изменения глубины на значения ускорений. В работе [ 3 ] произведен учет влияния нелинейных сил на значения данных ускорений в рамках нелинейной двумерной теории.

В настоящей работе рассматривается определение ускорений, возникающих в произвольных точках первого и второго судна при совместной качке на регулярном волнении на основании полного учета взаимного гидродинамического влияния качающихся судов.

**1.Описание расчетного метода**

Перемещения произвольной точки *m* судна А с координатами ( *X<sub>A</sub>, Y<sub>A</sub>, Z<sub>A</sub>*) согласно [1], определяются следующими выражениями :

$$\begin{aligned} \xi_{m1} &= \xi_{g1} - \chi_1 y_A + \psi_1 z_A; \\ \eta_{m1} &= \eta_{g1} - \theta_1 z_A + \chi_1 x_A; \\ \zeta_{m1} &= \zeta_{g1} - \psi_1 x_A + \theta_1 y_A. \end{aligned} \quad (1)$$

Для точки *m1* судна В с координатами ( *X<sub>B</sub>, Y<sub>B</sub>, Z<sub>B</sub>*):

$$\begin{aligned} \xi_{m2} &= \xi_{g2} - \chi_2 y_B + \psi_2 z_B; \\ \eta_{m2} &= \eta_{g2} - \theta_2 z_B + \chi_2 x_B; \\ \zeta_{m2} &= \zeta_{g2} - \psi_2 x_B + \theta_2 y_B. \end{aligned} \quad (2)$$

Дифференцируя дважды выражения (1)и (2), получим

$$\begin{aligned} \ddot{\xi}_{m1} &= \ddot{\xi}_{g1} - \ddot{\chi}_1 y_A + \ddot{\psi}_1 z_A; \\ \ddot{\eta}_{m1} &= \ddot{\eta}_{g1} - \ddot{\theta}_1 z_A + \ddot{\chi}_1 x_A; \\ \ddot{\zeta}_{m1} &= \ddot{\zeta}_{g1} - \ddot{\psi}_1 x_A + \ddot{\theta}_1 y_A, \\ \ddot{\xi}_{m2} &= \ddot{\xi}_{g2} - \ddot{\chi}_2 y_B + \ddot{\psi}_2 z_B; \\ \ddot{\eta}_{m2} &= \ddot{\eta}_{g2} - \ddot{\theta}_2 z_B + \ddot{\chi}_2 x_B; \\ \ddot{\zeta}_{m2} &= \ddot{\zeta}_{g2} - \ddot{\psi}_2 x_B + \ddot{\theta}_2 y_B, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} \ddot{\xi}_{gn} &= -\omega_k^2 \xi_{g0n} \sin(\omega_k t + \delta_{\xi_n}); \\ \ddot{\eta}_{gn} &= -\omega_k^2 \eta_{g0n} \sin(\omega_k t + \delta_{\eta_n}); \\ \ddot{\zeta}_{gn} &= -\omega_k^2 \zeta_{g0n} \sin(\omega_k t + \delta_{\zeta_n}); \\ \ddot{\theta}_n &= -\omega_k^2 \theta_{0n} \sin(\omega_k t + \delta_{\theta_n}); \\ \ddot{\psi}_n &= -\omega_k^2 \psi_{0n} \sin(\omega_k t + \delta_{\psi_n}); \\ \ddot{\chi}_n &= -\omega_k^2 \chi_{0n} \sin(\omega_k t + \delta_{\chi_n}), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\omega_k$  - кажущаяся частота.

Для определения амплитудных и фазовых значений горизонтальных и вертикальных ускорений точки *m* представим в соответствии с (4):

$$\begin{aligned} \ddot{\xi}_{nm} &= -\omega_k^2 \xi_{mAn} \sin(\omega_k t + \delta_{\xi_{nm}}); \\ \ddot{\eta}_{nm} &= -\omega_k^2 \eta_{mAn} \sin(\omega_k t + \delta_{\eta_{nm}}); \\ \ddot{\zeta}_{nm} &= -\omega_k^2 \zeta_{mAn} \sin(\omega_k t + \delta_{\zeta_{nm}}). \end{aligned} \quad (5)$$

Подставляя (4) и (5) в (3), после несложных преобразований найдем выражения для амплитуд перемещений произвольной точки каждого судна:

$$\xi_{mA1} = \sqrt{\begin{matrix} \xi_{g01}^2 + y_A^2 \chi_{01}^2 + z_A^2 \psi_{01}^2 - \\ - 2y_A \xi_{g01} \chi_{01} \cos(\delta_{\xi 1} - \delta_{\chi 1}) + \\ + 2z_A \xi_{g01} \psi_{01} \cos(\delta_{\xi 1} - \delta_{\psi 1}) - \\ - 2z_A y_A \chi_{01} \psi_{01} \cos(\delta_{\chi 1} - \delta_{\psi 1}) \end{matrix}};$$

$$\eta_{mA1} = \sqrt{\begin{matrix} \eta_{g01}^2 + x_A^2 \chi_{01}^2 + z_A^2 \theta_{01}^2 - \\ - 2z_A \eta_{g01} \theta_{01} \cos(\delta_{\eta 1} - \delta_{\theta 1}) + \\ + 2x_A \eta_{g01} \chi_{01} \cos(\delta_{\chi 1} - \delta_{\eta 1}) - \\ 2z_A x_A \chi_{01} \theta_{01} \cos(\delta_{\chi 1} - \delta_{\theta 1}) \end{matrix}}; (6)$$

$$\zeta_{mA1} = \sqrt{\begin{matrix} \zeta_{g01}^2 + x_A^2 \psi_{01}^2 + y_A^2 \theta_{01}^2 - \\ - 2x_A \zeta_{g01} \psi_{01} \cos(\delta_{\zeta 1} - \delta_{\psi 1}) + \\ + 2y_A \zeta_{g01} \theta_{01} \cos(\delta_{\zeta 1} - \delta_{\theta 1}) - \\ 2y_A x_A \psi_{01} \theta_{01} \cos(\delta_{\psi 1} - \delta_{\theta 1}) \end{matrix}}.$$

$$\xi_{mA2} = \sqrt{\begin{matrix} \xi_{g02}^2 + y_B^2 \chi_{02}^2 + z_B^2 \psi_{02}^2 - \\ - 2y_B \xi_{g02} \chi_{02} \cos(\delta_{\xi 2} - \delta_{\chi 2}) + \\ + 2z_B \xi_{g02} \psi_{02} \cos(\delta_{\xi 2} - \delta_{\psi 2}) - \\ 2z_B y_B \chi_{02} \psi_{02} \cos(\delta_{\chi 2} - \delta_{\psi 2}) \end{matrix}};$$

$$\eta_{mA2} = \sqrt{\begin{matrix} \eta_{g02}^2 + x_B^2 \chi_{02}^2 + z_B^2 \theta_{02}^2 - \\ - 2z_B \eta_{g02} \theta_{02} \cos(\delta_{\eta 2} - \delta_{\theta 2}) + \\ + 2x_B \eta_{g02} \chi_{02} \cos(\delta_{\chi 2} - \delta_{\eta 2}) - \\ 2z_B x_B \chi_{02} \theta_{02} \cos(\delta_{\chi 2} - \delta_{\theta 2}) \end{matrix}}; (7)$$

$$\zeta_{mA2} = \sqrt{\begin{matrix} \zeta_{g02}^2 + x_B^2 \psi_{02}^2 + y_B^2 \theta_{02}^2 - \\ - 2x_B \zeta_{g02} \psi_{02} \cos(\delta_{\zeta 2} - \delta_{\psi 2}) + \\ + 2y_B \zeta_{g02} \theta_{02} \cos(\delta_{\zeta 2} - \delta_{\theta 2}) - \\ 2y_B x_B \psi_{02} \theta_{02} \cos(\delta_{\psi 2} - \delta_{\theta 2}) \end{matrix}}.$$

$$\begin{aligned} \ddot{\xi}_{mA n} &= \omega_k^2 \xi_{mA n}; \\ \ddot{\eta}_{mA n} &= \omega_k^2 \eta_{mA n}; \\ \ddot{\zeta}_{mA n} &= \omega_k^2 \zeta_{mA n}, \\ n &= 1, 2 \end{aligned} \quad (8)$$

Входящие в выражения для ускорений (6)-(7) амплитуды и фазы качки определяются на основании решения соответствующей системы дифференциальных уравнений, подробно рассмотренной в [2].

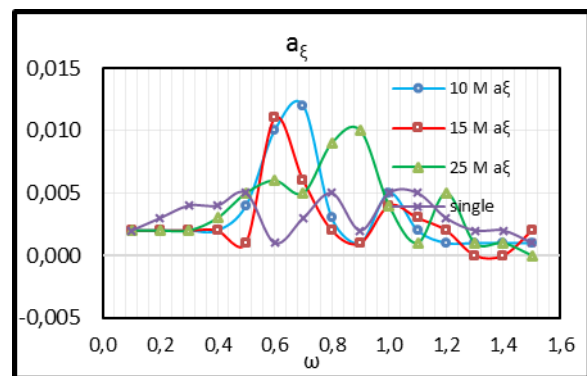
**2. Анализ результатов**

С целью оценки влияния гидродинамического взаимодействия, возникающего при совместной качке двух судов, были выполнены расчеты горизонтальных и вертикальных уско-

рений  $a_{\xi} = \frac{\ddot{\xi}_{mA}}{g}, a_{\eta} = \frac{\ddot{\eta}_{mA}}{g}, a_{\zeta} = \frac{\ddot{\zeta}_{mA}}{g}$  в

точке m1 (0, -B1/2, H1) на левом борту первого судна и в точке m2 (0, B2/2, H2) на правом борту второго судна на регулярном волнении лагом и на косом волнении и в точках на носовых перпендикулярах первого и второго судов на встречном волнении. Расчеты ускорений для различных пар судов выполнены в зависимости от изменения расстояния между ними и приведены в сопоставлении с аналогичными расчетами для изолированных судов (рис.1-5).

Анализ полученных результатов показал, что при расположении судов лагом к волнению, изменение расстояния между ними значительным образом влияет на все три составляющие ускорения как первого так и второго судна (рис.1)



Тогда, выражения для амплитудных значений ускорений будут иметь вид :

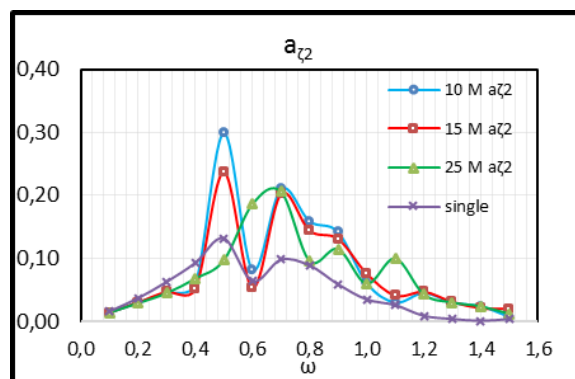
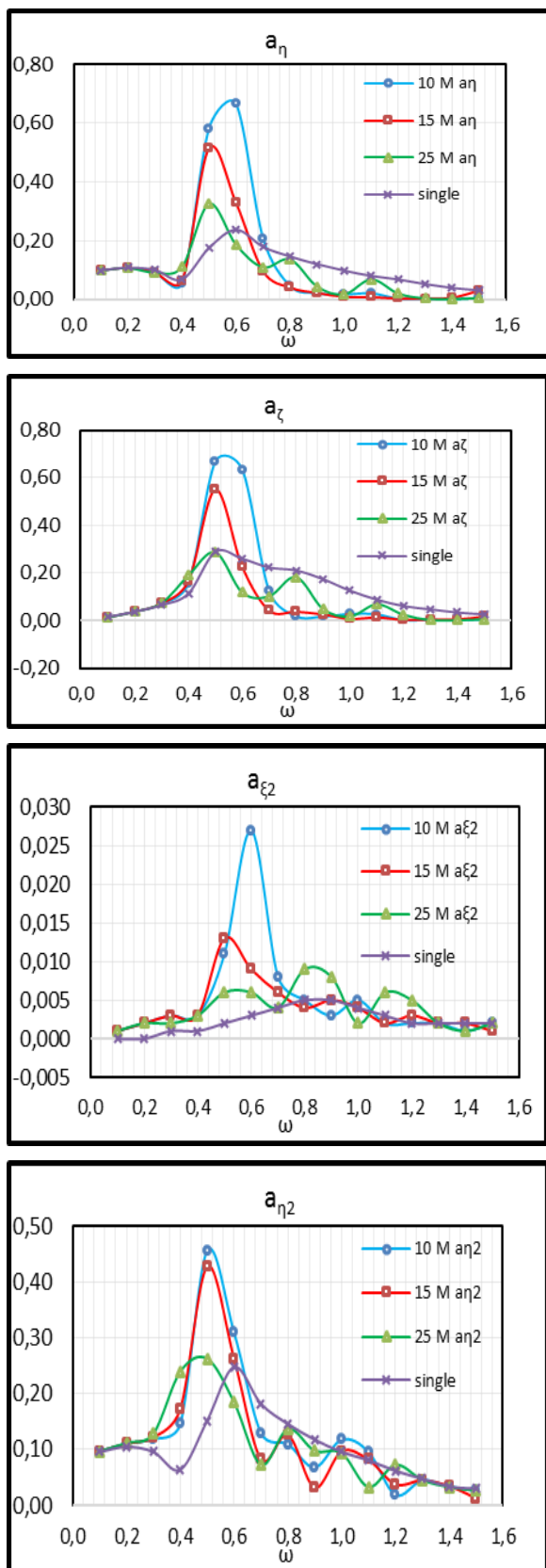


Рис. 1. Значения ускорений в точках на левом ( 0, -  $B_1/2, H_1$ ) и правом ( 0,  $B_2/2, H_2$ ) бортах судов лихтеровоз Алексей Косыгин и ледокол Севморпуть при  $\beta=90$  и  $H=20$ м.

Для поперечно-горизонтальных составляющих ускорения  $a_\eta$  и вертикальных  $a_\zeta$  данное влияние проявляется в области частот  $\omega < 0,8$ , а для продольно-горизонтальных на всем диапазоне частот. Уменьшение расстояния между судами приводит к значительному увеличению всех составляющих ускорений, возникающих на бортах первого и второго судна.

Так, при совместной качке лихтеровоза Алексей Косыгин и ледокола Севморпуть на глубине  $H=20$  м поперечно-горизонтальные ускорения  $a_\eta$  и  $a_{\eta 2}$  при расстоянии между судами  $d=10$ м и частоте  $\omega=0,5$  в 3 раза больше соответствующих ускорений, имеющих место для изолированных судов, вертикальные ускорения  $a_\zeta$  и  $a_{\zeta 2}$  - в 2-2,5 раза.

При увеличении расстояния между бортами до 25 м значения поперечно-горизонтальных и вертикальных ускорений становятся соизмеримыми с соответствующими величинами для изолированных судов.

Продольно-горизонтальные составляющие ускорения в наибольшей степени зависят от изменения расстояния между бортами. Для рассматриваемой пары судов значения  $a_\xi$  и  $a_{\xi 2}$  при  $d=10$  м и  $\omega=0,6$  в 10 раз больше соответствующих значений для изолированных судов (рис.1).

Расчеты ускорений, возникающих при качке на косых курсовых углах, приведены для пары судов лихтеровоз Алексей Косыгин –ледокол Севморпуть для случая встречного косоугольного волнения  $\beta=135$  и глубины фарватера  $H=20$ м и сухогруза Стахановец Котов- буксир для случая попутного косоугольного волнения  $\beta=45$  и  $H=12$  м (рис.2,3).



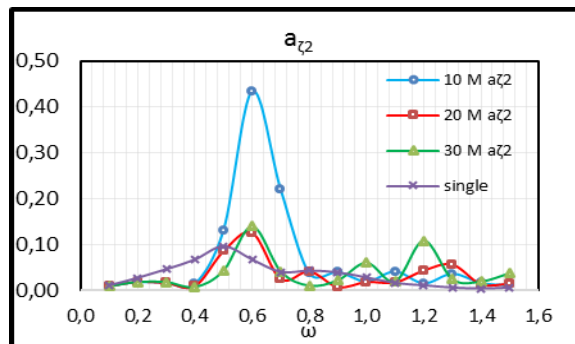
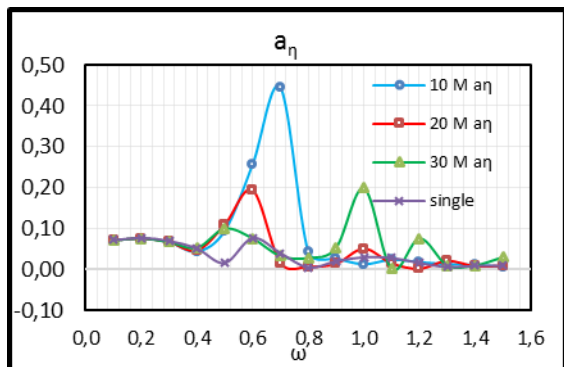
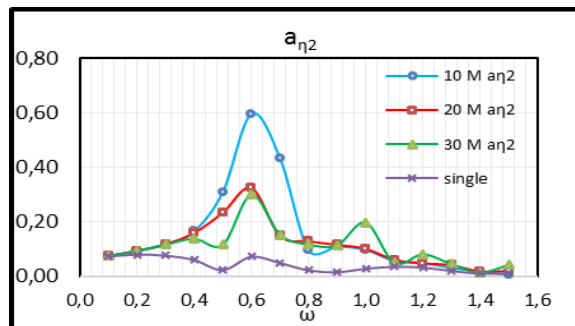
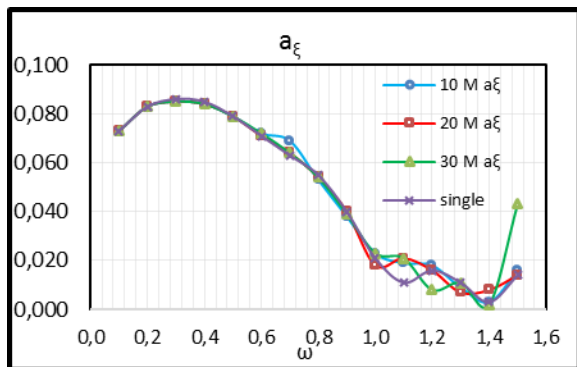
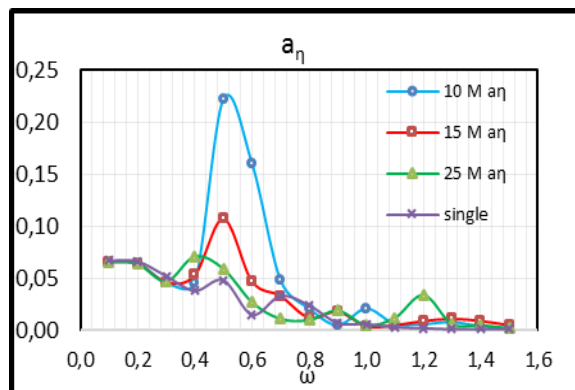
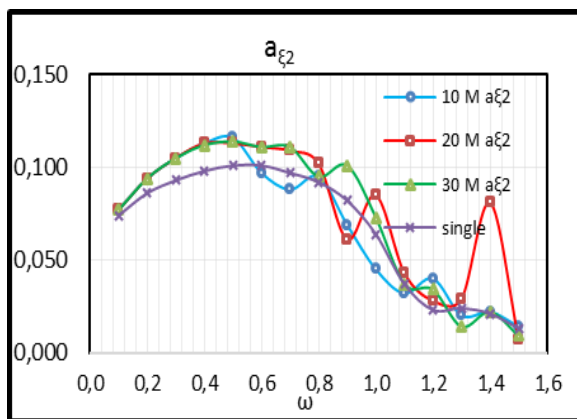
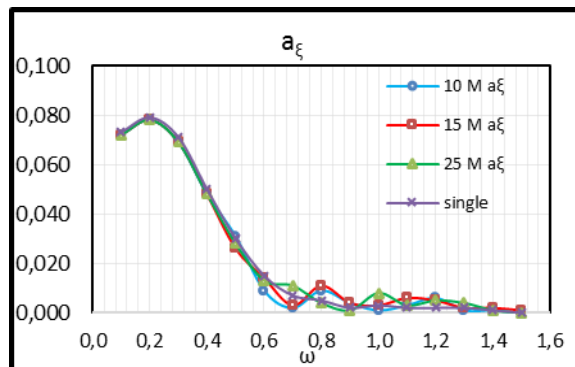
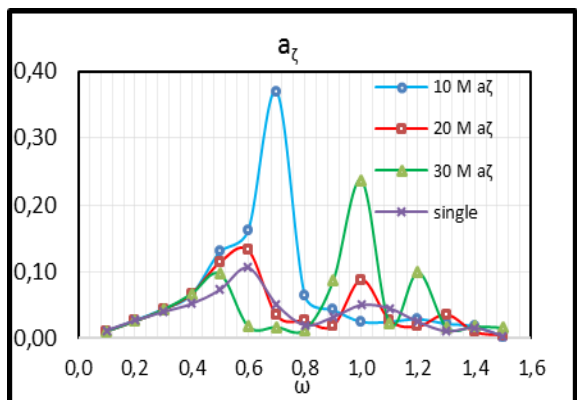


Рис.2. Значения ускорений в точках на левом ( $0, -B_1/2, H_1$ ) и правом ( $0, B_2/2, H_2$ ) бортах судов сухогруз Стахановец, Котов и буксир при  $\beta=45$  и  $H=12$ м.



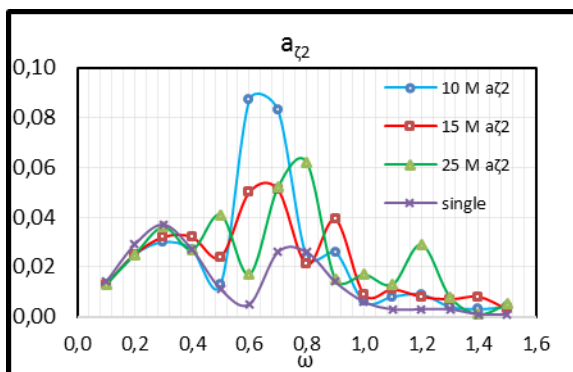
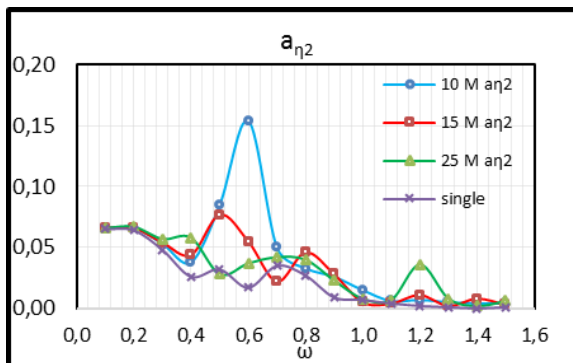
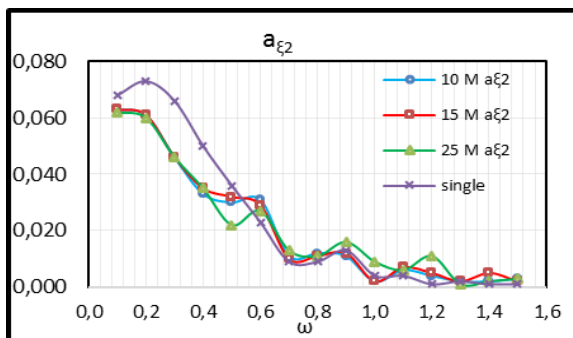
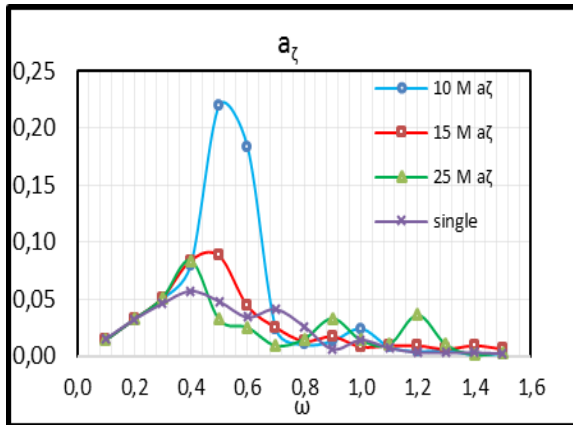


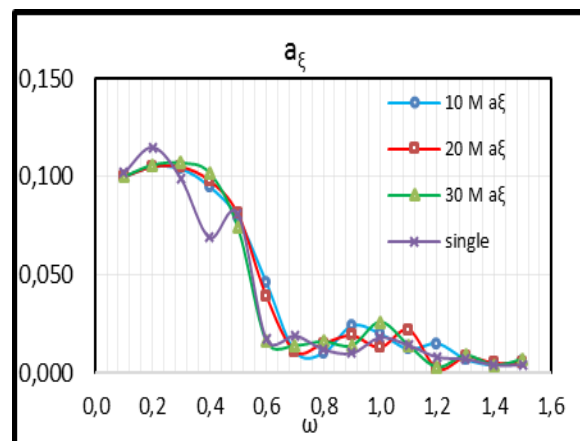
Рис.3 Значения ускорений в точках на левом ( $0, -V_1/2, H_1$ ) и правом ( $0, V_2/2, H_2$ ) бортах судов лихтеровоз Алексей Косыгин и ледокол Севморпуть при  $\beta=135$  и  $H=20$ м.

Из полученных результатов видно, что при совместной качке как на попутных, так и на

встречных косых углах изменение расстояния практически не влияет на продольно-горизонтальные ускорения, возникающих в точках на бортах первого и второго судна. При этом, для второго судна, находящегося с наветренной стороны, имеет место небольшое увеличение значений  $a_{z2}$  по сравнению с соответствующими значениями для изолированного судна на косом попутном волнении (рис.2) и уменьшение  $a_{z2}$  на косом встречном волнении (рис.3), что объясняется влиянием амплитуд и фаз продольно-горизонтальной качки. Для судна, расположенного с подветренной стороны, значения  $a_z$  не зависят от изменения расстояния между судами и практически полностью совпадают с соответствующими значениями продольно-горизонтальных ускорений, полученных для изолированных судов.

Изменение расстояния между судами при качке на косом волнении значительно влияет на поперечно-горизонтальные и вертикальные составляющие ускорений обоих судов. В наибольшей степени данное влияние имеет место в диапазоне частот  $0,4 < \omega < 0,8$ . Уменьшение расстояния между судами приводит к сдвигу максимальных значений ускорений в сторону больших частот и к их многократному увеличению по сравнению с ускорениями при качке изолированных судов. Например, в случае совместной качки сухогруза Стахановец Котов и буксира при расстоянии между бортами  $d=10$  м поперечно-горизонтальные и вертикальные ускорения первого судна в 9 и 7,5 раз больше соответствующих значений  $a_n$  и  $a_z$ , имеющих место при качке изолированного сухогруза. Ускорения  $a_{n2}$  и  $a_{z2}$  для второго судна (буксира) в случае совместной качки больше в 8 и 6 раз соответствующих ускорений, возникающих при качке изолированного буксира (рис.3).

На рис.4 приведены расчеты ускорений в точках на носовых перпендикулярах каждого судна при совместной качке на встречном волнении.



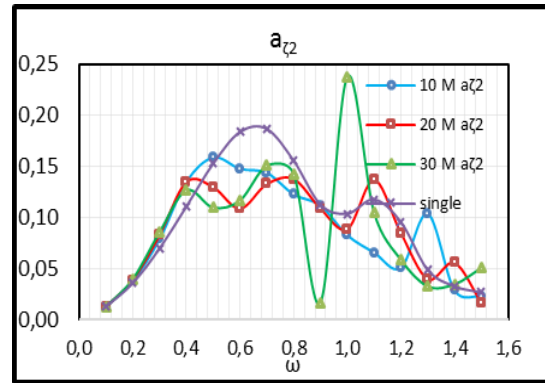
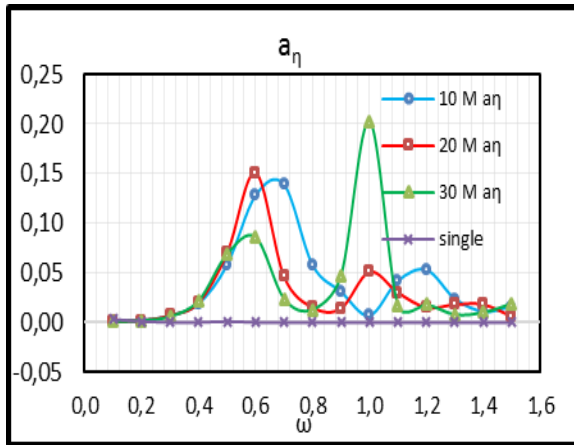
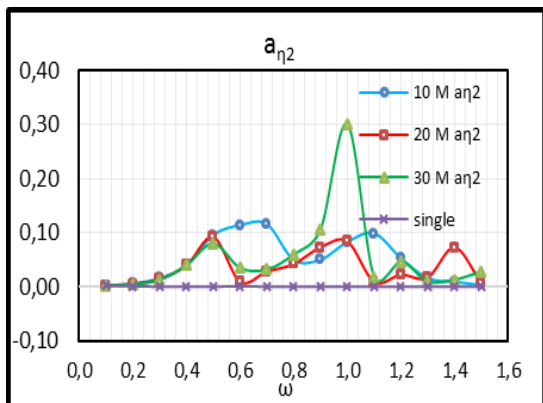
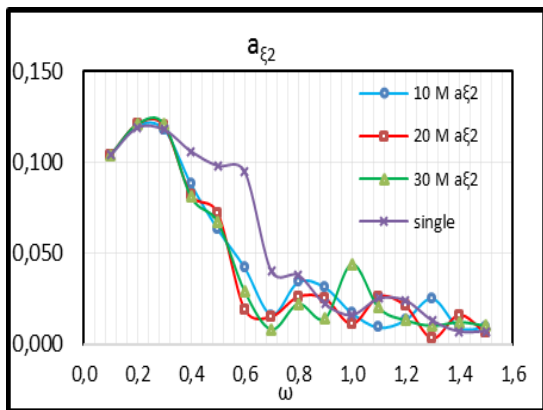
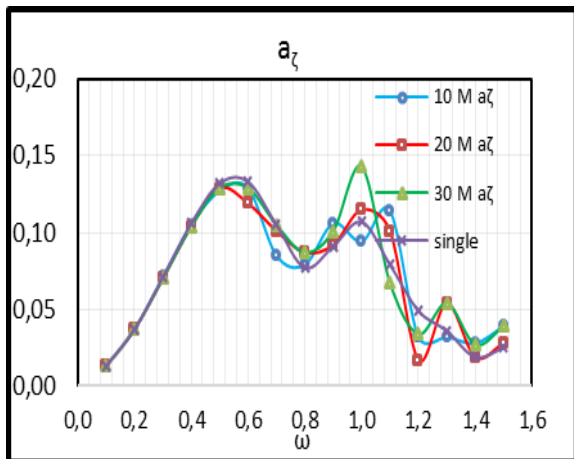


Рис.4. Значения ускорений в точках на носовых перпендикулярах судов сухогруз Стахановец Котов и буксир при  $\beta=180$  и  $H=12$ м



Аналогичные результаты были получены и для пары судов лихтеровоз Алексей Косыгин-ледокол Севморпуть (рис.5). Анализ полученных результатов показывает незначительное влияние изменения расстояния между судами на продольно-горизонтальные и вертикальные ускорения обоих судов. Для зависимостей вертикальных ускорений от частоты второго судна характерно наличие нескольких максимумов, обусловленных влиянием гидродинамического взаимодействия. Однако, в количественном отношении, значения  $a_{z2}$  соизмеримы с вертикальными ускорениями при качке изолированного судна.

Главной особенностью совместной качки на встречном волнении является появление поперечно-горизонтальных ускорений, отсутствующих при качке изолированных судов. Значения данных ускорений возрастают для обоих судов при уменьшении расстояния между ними и становятся соизмеримыми с вертикальными и продольно-горизонтальными составляющими ускорений.

Так, при совместной качке сухогруза Стахановец Котов и буксира на частоте  $\omega=0,6$  и глубине  $H=12$  м  $a_\eta=0,125$ ,  $a_z=0,13$  и  $a_\xi=0,05$  для сухогруза и  $a_{\eta2}=0,11$ ,  $a_{z2}=0,15$  и  $a_{\xi2}=0,045$  для буксира (рис.4). Для пары судов лихтеровоз Алексей Косыгин –ледокол Севморпуть отмечаются похожие соотношения составляющих ускорения (рис.5).

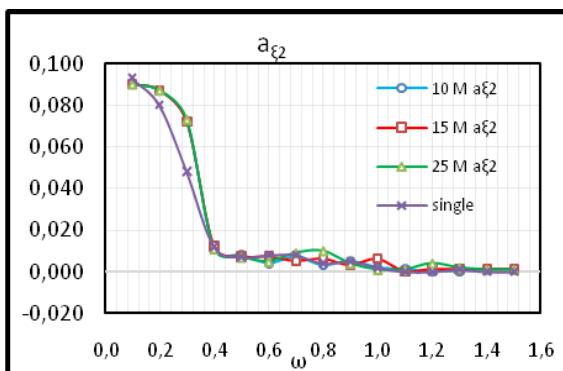
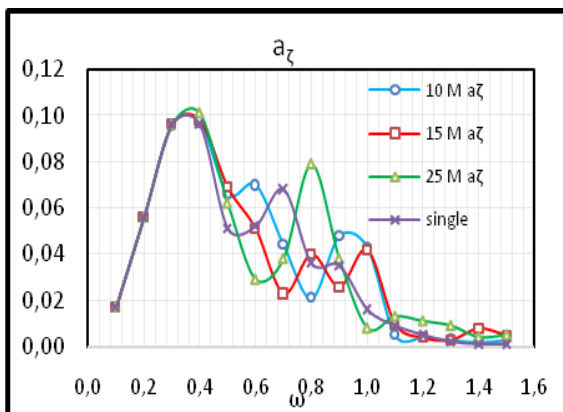
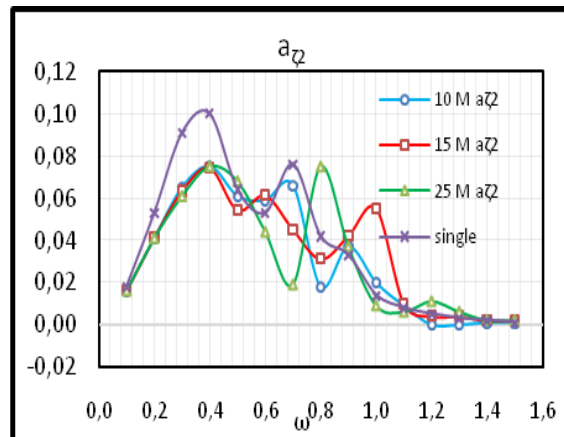
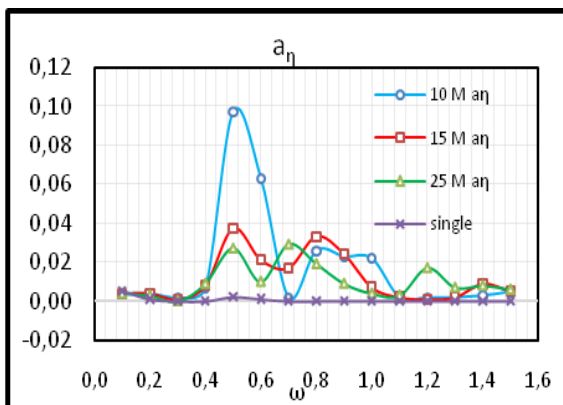
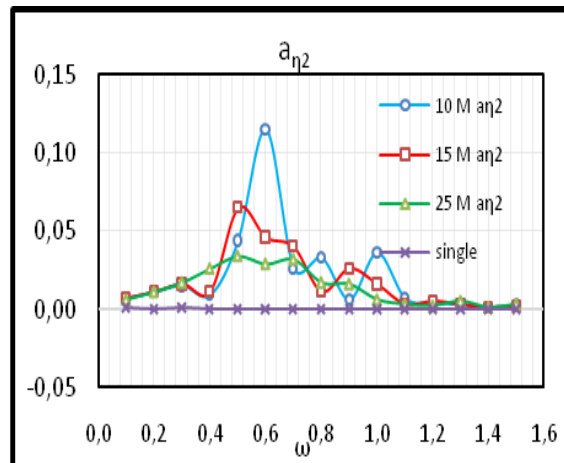
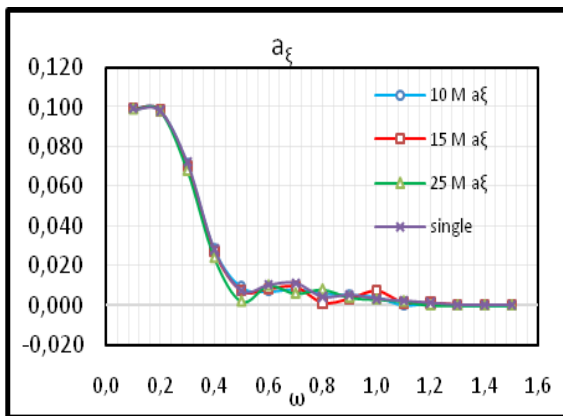


Рис.5. Значения ускорений в точках на носовых перпендикулярах судов лихтеровоз Алексей Косыгин и ледокол Севморпуть при  $\beta=180$  и  $H=20m$

Таким образом, в отличие от качки изолированного судна, при расчете общего ускорения необходимо учитывать поперечно-горизонтальные составляющие как для первого, так и для второго судна.

**Заключение**

Проведенное исследование влияния изменения расстояния между судами на амплитудные значения ускорений в произвольных точках на бортах и носовых перпендикулярах показало, что :

1. При расположении судов лагом и параллельно друг другу изменение расстояния между ними влияет на все три составляющие ускорения как первого, так и второго судна. Уменьшение расстояния между судами приводит к значительному увеличению всех составляющих ускорений, возникающих на бортах первого и второго судна.
2. При совместной качке на косом волнении изменение расстояния между судами влияет главным образом на поперечно-горизонтальные и вертикальные составляющие ускорения. Уменьшение расстояния приводит к многократному

- увеличению амплитудных значений ускорений.
3. На встречном волнении взаимосвязь колебаний судов вызывает появление поперечно-горизонтальных составляющих ускорения, отсутствующих при качке изолированного судна. Амплитуды поперечно-горизонтальных составляющих ускорения увеличиваются при уменьшении расстояния между судами

и становятся соизмеримыми с вертикальными и продольно-горизонтальными составляющими.

#### Литература

1. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Качка судов на морском волнении. Л., Судостроение, 1969.
2. Семенова В.Ю., Аунг М'о Тхант (2016). Расчеты амплитудно-частотных характеристик при совместной качке двух судов на регулярном волнении в условиях мелководья. Морские интеллектуальные технологии, N 4(34), стр.76-86
3. Семенова В.Ю. Со Чжо Ту (2014) Расчет ускорений, возникающих при поперечной качке судна на мелководье с учетом нелинейных сил второго порядка. Морской Вестник N2 (50), стр.99-101
4. Тан Хтун Аунг(2011).Определение ускорений, возникающих при качке судна на мелководье. Морской вестник N2(38).

#### 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 (2016). Raschety amplitudno-chastotnykh kharakteristik pri sovmestnoy kachke dvukh sudov na regul'yarnom volnenii v usloviyakh melkovod'ya. .Morskie intellektual'nye tekhnologii, N 4(34), str.76-86
3. Semenova V.Yu. So Chzho Tu (2014) Raschet uskorenyy, vznikayushchikh pri poperechnoy kachke sudna na melkovod'e s uchetom nelineynykh sil vtorogo poryadka. Morskoy Vestnik N2 (50), str.99-101
4. Tan Khtun Aung(2011).Opredelenie uskore-niy, vznikayushchikh pri kachke sudna na melko-vod'e. Morskoy vestnik N2(38).

УДК 629.12.073.243.4

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СИЛ ВТОРОГО ПОРЯДКА, ОБУСЛОВЛЕННЫХ СУММОЙ ЧАСТОТ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ПОПЕРЕЧНО-ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ, ВЕРТИКАЛЬНЫХ, БОРТОВЫХ КОЛЕБАНИЯХ КОНТУРА НА БИХРОМАТИЧЕСКОМ ВОЛНЕНИИ

**Семенова Виктория Юрьевна**

Д.т.н., профессор, профессор кафедры теории корабля  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10  
e-mail: sem\_viktoria@mail.ru

**Киав Тхура**

Аспирант  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10  
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 на бихроматическом волнении. 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. При этом авторами осуществляется точный учет нелинейного граничного условия на свободной поверхности жидкости. Результаты расчетов, полученные авторами сопоставляются с результатами Киоцука и 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. 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 данных составляющих нелинейных сил при построении методов расчета качки судна на нерегулярном волнении.

**Ключевые слова** : нелинейные силы второго порядка, метод интегральных уравнений, бихроматическое волнение, условие на свободной поверхности, сумма частот, потенциал, функция Грина, диффракция, 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 ON THE BICHROMATIC WAVES

**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  
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  
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 motions of a 2D- body on the bichromatic waves. 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 for the classical method of integral equations. At the same authors carried out an accurate account of non-linear boundary condition at the free surface of the liquid. The calculation results obtained by the authors, are compared with the results of Kyojuka and with the 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 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 these nonlinear forces in the elaboration of the methods of calculation of the motions of the ship on irregular waves is made.

**Key words:** nonlinear forces of the second order, method of integral equations, bichromatic waves, nonlinear boundary condition at the free surface of the liquid, the sum of frequencies, potential, function of Green, diffraction, irregular frequencies.

**Введение**

В работе авторов [1] было рассмотрено определение составляющих нелинейных сил, обусловленных суммой частот и возникающих при вертикальных, поперечно-горизонтальных, бортовых колебаниях контуров и их взаимодействии.

Настоящая статья является продолжением вышеуказанной работы и посвящена определению нелинейных сил, обусловленных суммой частот, возникающих при вертикальных, поперечно-горизонтальных, бортовых колебаниях шпангоутных контуров на бихроматическом волнении.

**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 на бихроматическом волнении. 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:

$$\Phi^{(2)} = (\phi_{77}^{(2)} + \phi_{27}^{(2)} + \phi_{37}^{(2)} + \phi_{47}^{(2)}) e^{-j(\omega_1 + \omega_2)t}, \quad (2)$$

где  $\phi_{27}^{(2)}, \phi_{37}^{(2)}, \phi_{47}^{(2)}$  потенциалы второго порядка, обусловленные взаимодействием отдельных видов колебаний с набегающим и диффрагированным волнением;  $\phi_{77}^{(2)}$  -диффракционный потенциал.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_{77}^{(2)}}{\partial n} &= 0; \\ \frac{\partial \phi_{37}^{(2)}}{\partial n} &= -\frac{j}{2} \frac{\partial^2 (\phi_{7_2}^{(1)} + \phi_{0_2}^{(1)})}{\partial s \partial \eta} - \\ & - \frac{j}{2} \frac{\partial^2 (\phi_{7_1}^{(1)} + \phi_{0_1}^{(1)})}{\partial s \partial \eta}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_{27}^{(2)}}{\partial n} &= \frac{j}{2} \frac{\partial^2 (\phi_{7_2}^{(1)} + \phi_{0_2}^{(1)})}{\partial s \partial \zeta} + \\ & + \frac{j}{2} \frac{\partial^2 (\phi_{7_1}^{(1)} + \phi_{0_1}^{(1)})}{\partial s \partial \zeta}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_{47}^{(2)}}{\partial n} &= -\frac{j}{2} \left\{ \frac{\partial (\phi_{7_2}^{(1)} + \phi_{0_2}^{(1)})}{\partial s} + \eta \frac{\partial^2 (\phi_{7_2}^{(1)} + \phi_{0_2}^{(1)})}{\partial s \partial \eta} + \right. \\ & \left. + \zeta \frac{\partial^2 (\phi_{7_2}^{(1)} + \phi_{0_2}^{(1)})}{\partial s \partial \zeta} \right\} - \\ & - \frac{j}{2} \left\{ \frac{\partial (\phi_{7_1}^{(1)} + \phi_{0_1}^{(1)})}{\partial s} + \eta \frac{\partial^2 (\phi_{7_1}^{(1)} + \phi_{0_1}^{(1)})}{\partial s \partial \eta} + \right. \\ & \left. + \zeta \frac{\partial^2 (\phi_{7_1}^{(1)} + \phi_{0_1}^{(1)})}{\partial s \partial \zeta} \right\}, \end{aligned}$$

$\phi_{7i}^{(1)}$  -диффракционные потенциалы первого порядка,  $\phi_{0i}^{(1)}$  -потенциал набегающего волнения

$$\phi_{0i}^{(1)} = j \frac{g}{\omega_i} a_{wi} \tilde{\phi}_{0i}^{(1)};$$

$$\tilde{\phi}_{0i}^{(1)} = j e^{K_i y} (\cos K_i x + j \sin K_i x),$$

Граничное условие на свободной поверхности жидкости при диффракционной задаче имеет вид:

$$\frac{\partial \phi_{77}^{(2)}}{\partial \zeta} - K_4 \phi_{77}^{(2)} = M_{77}^{(2)} =$$

$$= j \frac{(\omega_1 + \omega_2)}{g} \left\{ \frac{\partial(\phi_{71}^{(1)} + \phi_{01}^{(1)})}{\partial \eta} \frac{\partial(\phi_{72}^{(1)} + \phi_{02}^{(1)})}{\partial \eta} + \right.$$

$$+ \left. \frac{\partial(\phi_{71}^{(1)} + \phi_{01}^{(1)})}{\partial \zeta} \frac{\partial(\phi_{72}^{(1)} + \phi_{02}^{(1)})}{\partial \zeta} \right\} -$$

$$- \frac{j\omega_1}{2g} \left\{ (\phi_{71}^{(1)} + \phi_{01}^{(1)}) \left( \frac{\partial^2(\phi_{72}^{(1)} + \phi_{02}^{(1)})}{\partial \zeta^2} - K_2 \frac{\partial(\phi_{72}^{(1)} + \phi_{02}^{(1)})}{\partial \zeta} \right) \right\} -$$

$$- \frac{j\omega_2}{2g} \left\{ (\phi_{72}^{(1)} + \phi_{02}^{(1)}) \left( \frac{\partial^2(\phi_{71}^{(1)} + \phi_{01}^{(1)})}{\partial \zeta^2} - K_1 \frac{\partial(\phi_{71}^{(1)} + \phi_{01}^{(1)})}{\partial \zeta} \right) \right\} \quad (4)$$

При колебаниях на волнении

$$\frac{\partial \phi_{m7}^{(2)}}{\partial \zeta} - K_4 \phi_{m7}^{(2)} = M_{m7}^{(2)} = - \frac{j\omega_1}{2g} \left( (\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)}) \left( \frac{\partial^2 \phi_{m2}^{(1)}}{\partial \zeta^2} - K_2 \frac{\partial \phi_{m2}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) + \right.$$

$$+ \left. (\phi_{m1}^{(1)}) \left( \frac{\partial^2 \phi_{72}^{(1)}}{\partial \zeta^2} - K_2 \frac{\partial \phi_{72}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \right) - \frac{j\omega_2}{2g} \left( (\phi_{m2}^{(1)}) \left( \frac{\partial^2 \phi_{71}^{(1)}}{\partial \zeta^2} - K_1 \frac{\partial \phi_{71}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) + \right.$$

$$+ \left. (\phi_{02}^{(1)} + \phi_{72}^{(1)}) \left( \frac{\partial^2 \phi_{m1}^{(1)}}{\partial \zeta^2} - K_1 \frac{\partial \phi_{m1}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \right) +$$

$$+ \frac{j(\omega_1 + \omega_2)}{g} \left( \frac{\partial(\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)})}{\partial \eta} \frac{\partial(\phi_{m2}^{(1)})}{\partial \eta} + \frac{\partial(\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)})}{\partial \zeta} \frac{\partial(\phi_{m2}^{(1)})}{\partial \zeta} + \right.$$

$$+ \left. \frac{\partial(\phi_{02}^{(1)} + \phi_{72}^{(1)})}{\partial \eta} \frac{\partial(\phi_{m1}^{(1)})}{\partial \eta} + \frac{\partial(\phi_{02}^{(1)} + \phi_{72}^{(1)})}{\partial \zeta} \frac{\partial(\phi_{m1}^{(1)})}{\partial \zeta} \right);$$

$$K_1 = \frac{(\omega_1)^2}{g}; \quad K_2 = \frac{(\omega_2)^2}{g}; \quad K_4 = \frac{(\omega_1 + \omega_2)^2}{g}. \quad (5)$$

В условиях (3)-(5) потенциалы первого порядка для каждого вида колебаний определяются на основании решения соответствующих линейных задач.

Для определения всех потенциалов второго порядка используется комбинированный метод интегральных уравнений Гельмгольца [4], основанный на введении следующих комбинаций:

$$\phi_{77}^{(2)} = \phi_{771} + \phi_{772};$$

$$\phi_{7k}^{(2)} = \phi_{7k1} + \phi_{7k2}, \quad (6)$$

где потенциалы  $\phi_{771}, \phi_{k1}$  учитывают граничное условие на свободной поверхности, а  $\phi_{772}, \phi_{k2}$  - на контуре. Тогда, можно записать:

$$\frac{\partial \phi_{772}}{\partial n} = \frac{\partial \phi_{77}^{(2)}}{\partial n} - \frac{\partial \phi_{771}}{\partial n};$$

$$\frac{\partial \phi_{7k2}}{\partial n} = \frac{\partial \phi_{7k}^{(2)}}{\partial n} - \frac{\partial \phi_{7k1}}{\partial n} \quad (7)$$

Пределы граничного условия на свободной поверхности жидкости (4),(5) на бесконечном

удалении от контура для каждого вида колебаний, а также для дифракционной задачи представляет собой осциллирующую функцию. В связи с этим, для определения функций  $\phi_{m71}, \phi_{771}$  используется модифицированный метод Вехаузена-Лайтона [4], согласно которому:

$$\phi_{m71} + i\tilde{\phi}_{m71} = \frac{(\text{Re } A_{m7} + j \text{Im } A_{m7})}{K' - K_4} [e^{jK'\eta_1} + j e^{jK'\eta_1}]$$

$$- j \frac{(\text{Re } A_{m7} + j \text{Im } A_{m7})}{\pi} \left[ \frac{e^{iK'\tilde{\zeta}} E_1(iK'\tilde{\zeta})}{K' + K_4} + \frac{e^{-iK'\tilde{\zeta}} E_1(-iK'\tilde{\zeta})}{K' - K_4} \right] +$$

$$+ 2i \int_{\eta_1}^{\infty} \tilde{M}_{m7} e^{-iK_4(\tilde{\zeta}-l)} dl + \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{M}_{m7} e^{-iK_4(\tilde{\zeta}-l)} E_1(-iK_4(\tilde{\zeta}-l)) dl +$$

$$+ (j-i) \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{M}_{m7} e^{-iK_4(\tilde{\zeta}-l)} dl, \quad (8)$$

$$\phi_{771} + i\tilde{\phi}_{771} = \frac{(\text{Re } A_{77} + j \text{Im } A_{77})}{K' - K_4} [e^{jK'\eta_1} + j e^{jK'\eta_1}]$$

$$- j \frac{(\text{Re } A_{77} + j \text{Im } A_{77})}{\pi} \left[ \frac{e^{iK'\tilde{\zeta}} E_1(iK'\tilde{\zeta})}{K' + K_4} + \frac{e^{-iK'\tilde{\zeta}} E_1(-iK'\tilde{\zeta})}{K' - K_4} \right] +$$

$$+ 2i \int_{\eta_1}^{\infty} \tilde{M}_{77} e^{-iK_4(\tilde{\zeta}-l)} dl + \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{M}_{77} e^{-iK_4(\tilde{\zeta}-l)} E_1(-iK_4(\tilde{\zeta}-l)) dl +$$

$$+ (j-i) \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{M}_{77} e^{-iK_4(\tilde{\zeta}-l)} dl, \quad (9)$$

$$\tilde{M}_{m7} = M_{m7}^{(2)} -$$

$$- (\text{Re } A_{m71+} + j \text{Im } A_{m71+}) \cdot e^{jK'\eta_1} -$$

$$- (\text{Re } A_{m72+} + j \text{Im } A_{m72+}) \cdot e^{-jK'\eta_1};$$

$$\tilde{M}_{77} = M_{77}^{(2)} -$$

$$- (\text{Re } A_{771+} + j \text{Im } A_{771+}) \cdot e^{jK'\eta_1} -$$

$$- (\text{Re } A_{772+} + j \text{Im } A_{772+}) \cdot e^{-jK'\eta_1}$$

$$K' = K_1 - K_2,$$

где

$$A_{m7n+} = A_{m7Sn+} + A_{m7An+};$$

$$A_{77n+} = A_{77Sn+} + A_{77An+},$$

$$A_{77A1+} = - \frac{j}{g} (\omega_1 + \omega_2) K_1 K_2 (-jA_{71S} e^{j(\delta_{71S})} - A_{71A} e^{j(\delta_{71A})});$$

$$A_{77A2+} = - \frac{j}{g} (\omega_1 + \omega_2) K_1 K_2 (-jA_{72S} e^{j(\delta_{72S})} - A_{72A} e^{j(\delta_{72A})});$$

$$A_{77S1+} = - \frac{j}{g} (\omega_1 + \omega_2) K_1 K_2 (jA_{71S} e^{j(\delta_{71S})} + A_{71A} e^{j(\delta_{71A})});$$

$$A_{77S2+} = - \frac{j}{g} (\omega_1 + \omega_2) K_1 K_2 (jA_{72S} e^{j(\delta_{72S})} + A_{72A} e^{j(\delta_{72A})}) \quad (10)$$



$$\begin{aligned}
 A_{m7S2+} &= \frac{j}{g} (\omega_1 + \omega_2) K_1 K_2 j A_{m2} e^{j(\delta_{m2})}; \\
 A_{m7S1+} &= \frac{j}{g} (\omega_1 + \omega_2) j K_1 K_2 A_{m1} e^{j(\delta_{m1})}; \\
 A_{m7A2+} &= -\frac{j}{g} (\omega_1 + \omega_2) K_1 K_2 j A_{m2} e^{j(\delta_{m2})}; \\
 A_{m7A1+} &= -\frac{j}{g} (\omega_1 + \omega_2) j K_1 K_2 A_{m1} e^{j(\delta_{m1})} \quad (11)
 \end{aligned}$$

В выражениях (10),(11)  $A_{m7}, A_{77}, \delta_m, \delta_7$  - представляют собой амплитудные и фазовые характеристики соответствующих потенциалов первого порядка

Все потенциалы второго порядка  $\phi_{mk2}, \phi_{mm2}$  определяются на основании решения следующих систем интегральных уравнений

$$\begin{aligned}
 & -\phi_{m72}(\eta, \zeta) + \\
 & + \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L \phi_{m72}(\eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G}{\partial n}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds = \\
 & = \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L \frac{\partial \phi_{m72}}{\partial n} \cdot G(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds; \\
 & -\phi_{772}(\eta, \zeta) + \quad (12) \\
 & + \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L \phi_{772}(\eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G}{\partial n}(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds = \\
 & = \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L \frac{\partial \phi_{772}}{\partial n} \cdot G(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) ds,
 \end{aligned}$$

где функция Грина имеет вид:

$$\begin{aligned}
 G(\eta, \zeta, \eta_1, \zeta_1) &= \text{Re}_j \left\{ \log \left( \frac{\tilde{\zeta} - \zeta^*}{\tilde{\zeta} - \zeta_1} \right) + \right. \\
 & + \left. 2 \int_0^\infty \frac{e^{-jk(\tilde{\zeta} - \zeta^*)}}{K_4 - k} dk - j2\pi e^{-jK_4(\tilde{\zeta} - \zeta^*)} \right\}, \\
 \tilde{\zeta} &= \eta + j\zeta; \quad \zeta^* = \eta_1 + j\zeta_1; \quad (13) \\
 \bar{\zeta}^* &= \eta_1 - j\zeta_1
 \end{aligned}$$

После определения всех потенциалов второго порядка легко определить давление, действующее на контур и все гидродинамические силы, возникающие при поперечно-горизонтальных, вертикальных и бортовых колебаний. Выражения для давлений второго порядка будут иметь вид :

$$\begin{aligned}
 p_{27}^{(2)} &= -\rho \left( -j(\omega_1 + \omega_2) \phi_{27}^{(2)} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial(\phi_{21}^{(1)})}{\partial \eta} \frac{\partial(\phi_{02}^{(1)} + \phi_{72}^{(1)})}{\partial \eta} + \right. \right. \\
 & + \frac{\partial(\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)})}{\partial \zeta} \frac{\partial(\phi_{22}^{(1)})}{\partial \zeta} + \frac{\partial(\phi_{21}^{(1)})}{\partial \zeta} \frac{\partial(\phi_{02}^{(1)} + \phi_{72}^{(1)})}{\partial \zeta} \\
 & + \left. \frac{\partial(\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)})}{\partial \eta} \frac{\partial(\phi_{22}^{(1)})}{\partial \eta} \right) + \\
 & + \frac{b}{2} \left( \omega_1 \frac{\partial(\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)})}{\partial \eta} + \omega_2 \frac{\partial(\phi_{02}^{(1)} + \phi_{72}^{(1)})}{\partial \eta} \right); \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_{37}^{(2)} &= -\rho \left( -j(\omega_1 + \omega_2) \phi_{37}^{(2)} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial(\phi_{31}^{(1)})}{\partial \eta} \frac{\partial(\phi_{02}^{(1)} + \phi_{72}^{(1)})}{\partial \eta} + \right. \right. \\
 & + \frac{\partial(\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)})}{\partial \zeta} \frac{\partial(\phi_{32}^{(1)})}{\partial \zeta} + \frac{\partial(\phi_{31}^{(1)})}{\partial \zeta} \frac{\partial(\phi_{02}^{(1)} + \phi_{72}^{(1)})}{\partial \zeta} + \\
 & + \left. \frac{\partial(\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)})}{\partial \eta} \frac{\partial(\phi_{32}^{(1)})}{\partial \eta} \right) + \\
 & + \frac{b}{2} \left( \omega_1 \frac{\partial(\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)})}{\partial \zeta} + \omega_2 \frac{\partial(\phi_{02}^{(1)} + \phi_{72}^{(1)})}{\partial \zeta} \right); \quad (15)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_{77}^{(2)} &= -\rho \left( -j(\omega_1 + \omega_2) \phi_{77}^{(2)} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial(\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)})}{\partial \eta} \frac{\partial(\phi_{02}^{(1)} + \phi_{72}^{(1)})}{\partial \eta} + \right. \right. \\
 & + \left. \left. \frac{\partial(\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)})}{\partial \zeta} \frac{\partial(\phi_{02}^{(1)} + \phi_{72}^{(1)})}{\partial \zeta} \right) \right); \quad (16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_{47}^{(2)} &= -\rho \left( -j(\omega_1 + \omega_2) \phi_{47}^{(2)} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial(\phi_{41}^{(1)})}{\partial \eta} \frac{\partial(\phi_{02}^{(1)} + \phi_{72}^{(1)})}{\partial \eta} + \right. \right. \\
 & + \frac{\partial(\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)})}{\partial \zeta} \frac{\partial(\phi_{42}^{(1)})}{\partial \zeta} + \frac{\partial(\phi_{41}^{(1)})}{\partial \zeta} \frac{\partial(\phi_{02}^{(1)} + \phi_{72}^{(1)})}{\partial \zeta} \\
 & + \left. \frac{\partial(\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)})}{\partial \eta} \frac{\partial(\phi_{42}^{(1)})}{\partial \eta} \right) + \\
 & + \frac{1}{2} \left( \omega_1 \left( \eta \frac{\partial(\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)})}{\partial \zeta} - \zeta \frac{\partial(\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)})}{\partial \eta} \right) + \right. \\
 & + \omega_2 \left( \eta \frac{\partial(\phi_{02}^{(1)} + \phi_{72}^{(1)})}{\partial \zeta} - \zeta \frac{\partial(\phi_{02}^{(1)} + \phi_{72}^{(1)})}{\partial \eta} \right) \left. \right) - \\
 & - \rho \frac{1}{2} (\omega_1 (\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)}) + \omega_2 (\phi_{02}^{(1)} + \phi_{72}^{(1)})) \quad (17)
 \end{aligned}$$

Все нелинейные силы и моменты определяются путем интегрирования выражений (14)-(17) 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.2-4 представлены результаты расчетов нелинейных вертикаль-

ных 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

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

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

(18)

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

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  $\delta_1 = \frac{\omega_1^2 b}{g}$  и

$$\delta_2 = \frac{\omega_2^2 b}{g}.$$

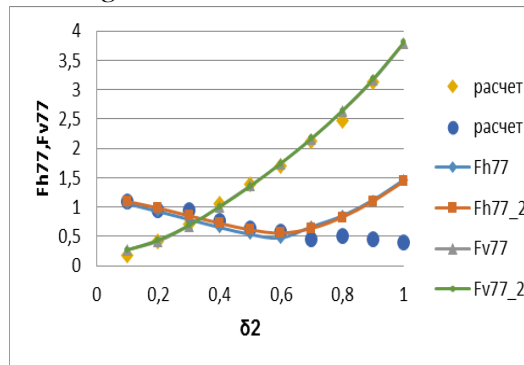
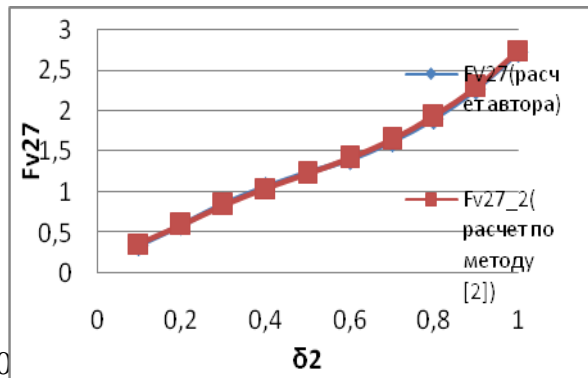


Рис. 1 Значения нелинейных дифракционных вертикальных и горизонтальных сил, обусловленных суммой частот для круглого контура. Сравнения расчетов

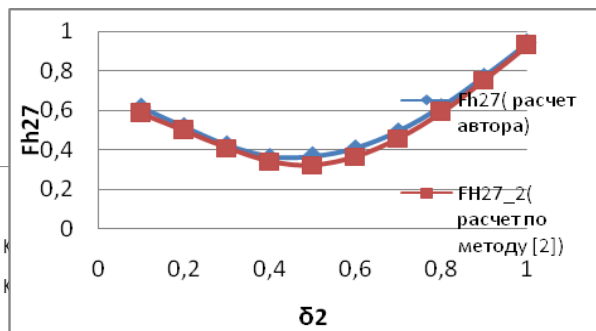
Расчеты нелинейных дифракционных сил, обусловленных суммой частот, для круглого контура были сопоставлены с расчетами Кузюка [3]. Расчеты проводились для безразмерных волновых чисел  $\delta_1=1$  и  $\delta_2$ , изменяющегося в пределах от 0.1 до 1. Результаты сравнений с расчетами Кузюка представлены на рис.1.

Из приведенных сравнений видно полное согласование результатов расчетов вертикальных дифракционных сил, обусловленных суммой частот. Горизонтальные дифракционные силы, обусловленные суммой частот совпадают с расчетами Кузюка в диапазоне  $\delta_2 < 0,7$ . При дальнейшем увеличении волнового числа наблюдается расхождение результатов, связанное с применением приближенной аппроксимации нелинейного граничного условия на свободной поверхности жидкости в работе Кузюка [3]. Между тем, расчеты, выполненные по разработанному методу, полностью совпадают с расчетами, по программе, разработанной на основании метода [2], реализующего решение задачи на основании комбинации метода конформного

отображения и метода гидродинамических особенностей.

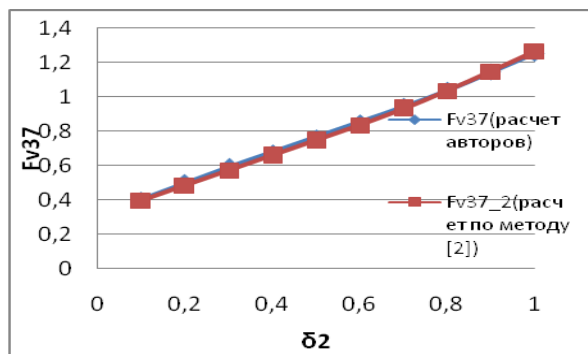


А)

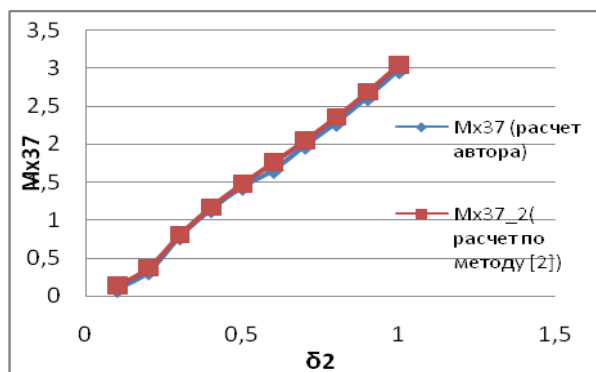


Б)

Рис 2 Значения нелинейных вертикальных (А)и горизонтальных(Б) сил, обусловленных суммой частот и возникающих при поперечно-горизонтальных колебаниях прямоугольного контура( T/b=1,β=1) на бихроматическом волнении. Сравнения расчетов

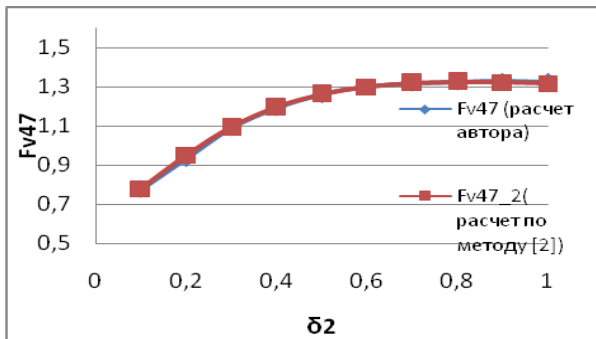


А)

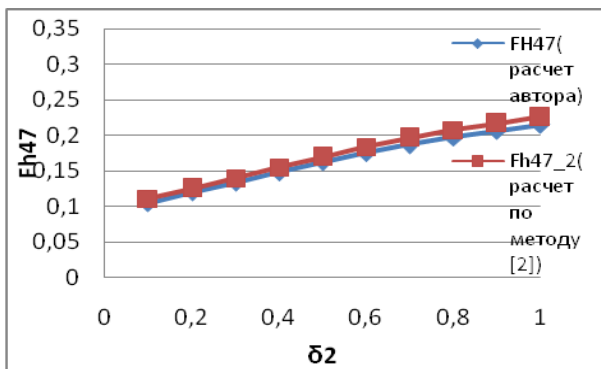


Б)

Рис.3 Значения нелинейных вертикальных сил и моментов, обусловленных суммой частот и возникающих при вертикальных колебаниях бульбообразного контура ( $T/b=2,5; \beta=0,7$ ) на бихроматическом волнении



А)



Б)

Рис.4 Значения нелинейных вертикальных и горизонтальных сил, обусловленных суммой частот и возникающих при бортовых колебаниях U-образного контура ( $T/b=0,6; \beta=0,9$ ) на волнении

На рис. 2-4 представлены расчеты нелинейных сил, возникающих при взаимодействии вертикальных, поперечно-горизонтальных, бортовых колебаний с набегающим и дифрагированным волнением.

Проведенное сравнение расчетов по изложенному методу с расчетами по методу [2] для разных контуров показало отличное совпадение результатов (рис.2-4).

В целях исследования влияния отношения осадки к полуширине на значения нелинейных сил и моментов были произведены расчеты для двух групп контуров, приведенных в [1]. 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.5-10

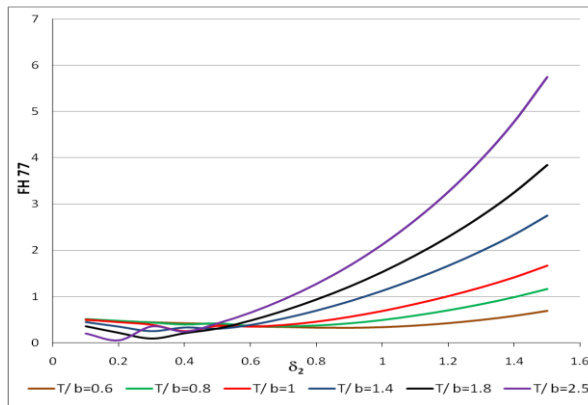


Рис. 5 Значения нелинейных горизонтальных дифракционных сил, обусловленных суммой частот, в зависимости от изменения отношения  $T/b$  для бульбообразных шпангоутов

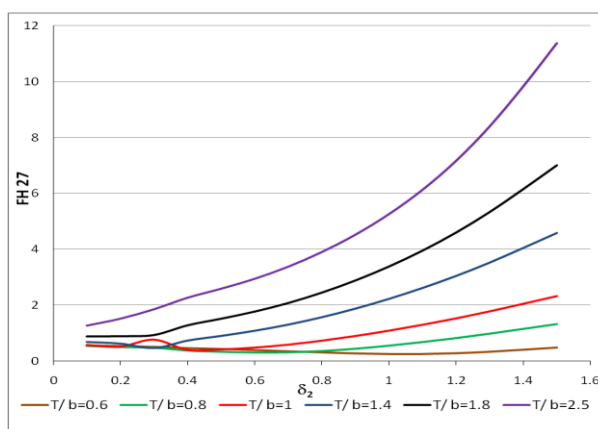


Рис. 6 Значения нелинейных горизонтальных сил, возникающих при поперечно-горизонтальных колебаниях на волнении в зависимости от изменения отношения  $T/b$  для бульбообразных шпангоутов

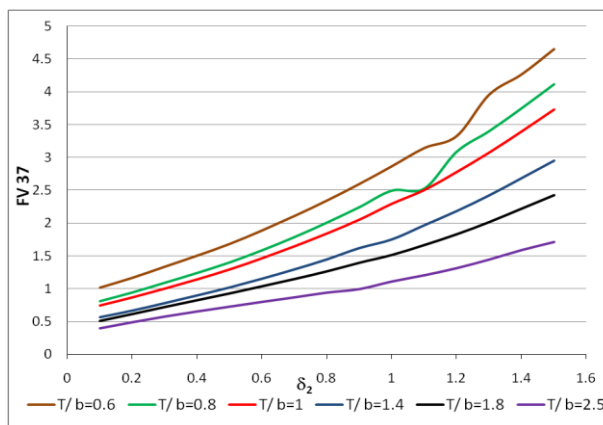


Рис. 7 Значения нелинейных вертикальных сил, возникающих при ВК на волнении в зависимости от изменения отношения  $T/b$  для бульбообразных шпангоутов

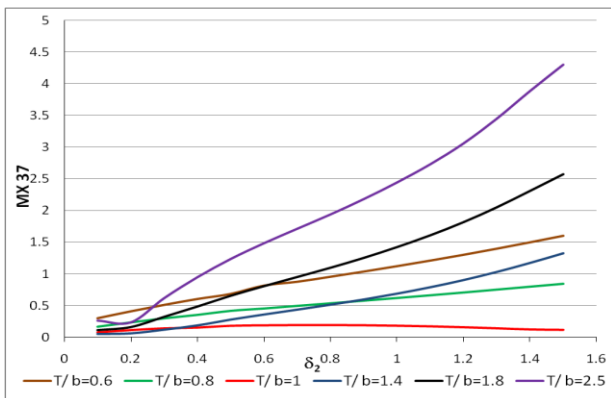


Рис. 8 Значения нелинейных моментов, возникающих при ВК на волнении в зависимости от изменения отношения  $T/b$  для бульбообразных шпангоутов

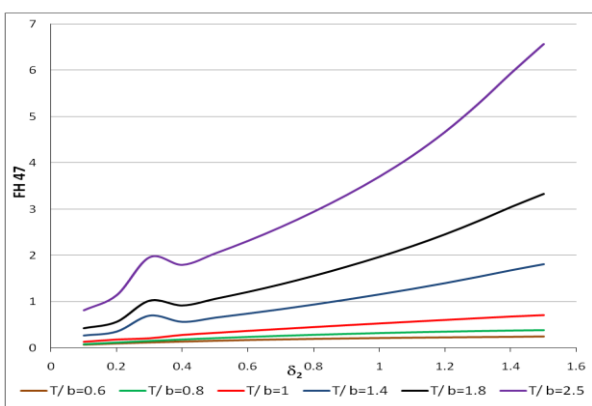


Рис. 9. Значения нелинейных горизонтальных сил, возникающих при БК на волнении в зависимости от изменения отношения  $T/b$  для U-образных шпангоутов

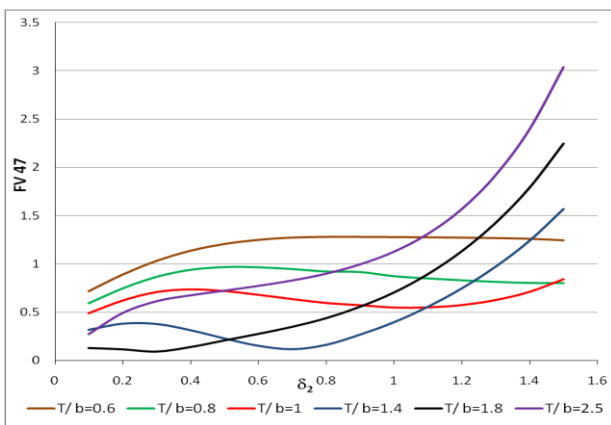


Рис. 10 Значения нелинейных вертикальных сил, возникающих при БК на волнении в зависимости от изменения отношения  $T/b$  для U-образных шпангоутов

Результаты расчетов нелинейных дифракционных сил и моментов, обусловленных суммой частот приведены на рис. 5. Полученные результаты показали, что вертикальные силы и моменты являются возрастающими функциями волнового числа  $\delta_2$ , а следовательно и суммы волно-

вых чисел  $\delta_1 + \delta_2$ . Нелинейные горизонтальные силы также возрастают при увеличении  $\delta_2$ . При этом для них отмечено наличие волнообразного изгиба графика, характерного для нелинейных горизонтальных дифракционных сил  $Fh_{77}(2\omega)$ , обусловленных удвоенным значением частоты и подробно рассмотренных в работе [ 2 ]. При уменьшении отношения  $T/b$  местоположение данного волнообразного изгиба смещается в сторону больших значений волновых чисел (рис.5).

Исследование влияния изменения отношения  $T/b$  на данные силы показало, что горизонтальные дифракционные силы увеличиваются при увеличении отношения  $T/b$ , а вертикальные, наоборот, увеличиваются при уменьшении данного отношения.

Нелинейные дифракционные моменты уменьшаются при увеличении  $T/b$  от 0.6 до 1, затем при дальнейшем увеличении отношения  $T/b$  моменты резко увеличиваются. Так, при  $\delta_2=1$  ( $\delta_2 + \delta_1=2,5$ )  $Mx_{77+}(T/b=2,5)$  больше  $Mx_{77+}(T/b=0,6)$  в 6 раз.

На рис.6-10 представлены результаты расчетов нелинейных сил и моментов, возникающих при взаимодействии поперечно-горизонтальных, вертикальных и бортовых колебаниях с набегающим и дифрагированным волнением. Из представленных результатов видно, что все без исключения нелинейные силы и моменты являются возрастающими функциями суммы частот. Для горизонтальных сил  $Fh_{27+}$  характерно наличие волнообразного изгиба графика, аналогичного для сил  $Fh_{77+}$  и  $Fh_{22+}$ .

В случае поперечно-горизонтальных колебаний на бихроматическом волнении увеличение отношения  $T/b$  приводит к увеличению нелинейных горизонтальных и вертикальных сил. Нелинейные моменты  $Mx_{27+}$  уменьшаются при увеличении  $T/b$  от 0.6 до 1, затем резко увеличивают свои значения при дальнейшем увеличении  $T/b$  до 2.5

При взаимодействии вертикальных колебаний с набегающим и дифрагированным волнением увеличение отношения  $T/b$  приводит к увеличению нелинейных горизонтальных сил практически на всем диапазоне изменения волновых чисел  $\delta_2$  и к уменьшению нелинейных вертикальных сил. Так, нелинейная сила  $Fv_{37+}(T/b=2,5)$  в 2,75 раз меньше аналогичной силы  $Fv_{37+}(T/b=0,6)$  для волнового числа  $\delta_2=1$ (рис.7)

Нелинейные моменты  $Mx_{37+}$ , также как и моменты при поперечно-горизонтальных колебаниях  $Mx_{27+}$  уменьшаются при увеличении  $T/b$  от 0.6 до 1, затем возрастают., достигая наибольших значений при наибольшем  $T/b$ ( рис.8)

Анализ результатов расчетов нелинейных сил при бортовых колебаниях показал, что увеличение отношения  $T/b$  приводит к увеличению значений нелинейных горизонтальных сил  $Fh_{47+}$  на всем диапазоне частот(рис.9).

Нелинейные вертикальные силы  $F_{v47+}$  и моменты  $M_{47+}$  уменьшаются при увеличении  $T/b$  от 0.6 до 1 и увеличиваются при дальнейшем возрастании отношения  $T/b$  (рис.10)

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.

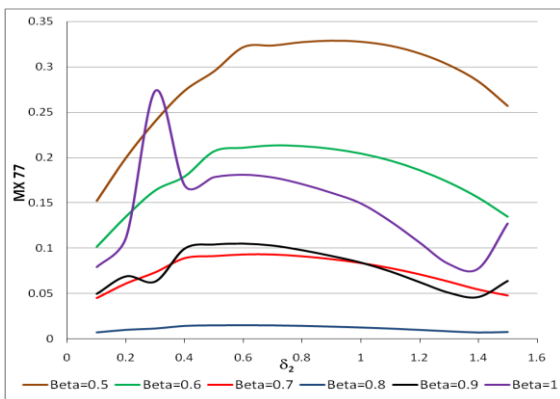


Рис.11 Значения нелинейных дифракционных моментов в зависимости от изменения коэффициента полноты  $\beta$  при  $T/b=1$

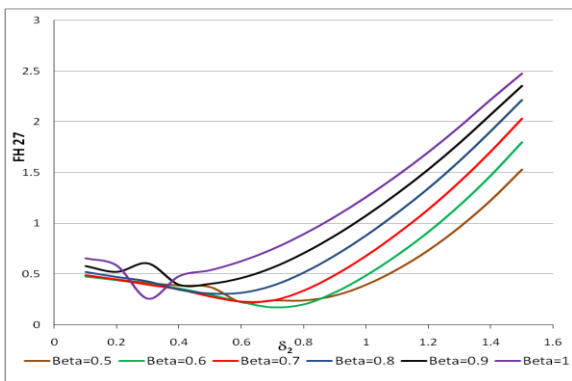


Рис.12 Значения нелинейных горизонтальных сил , возникающих при ПГК контуров на волнении в зависимости от изменения коэффициента полноты ( $T/b=1$ ).

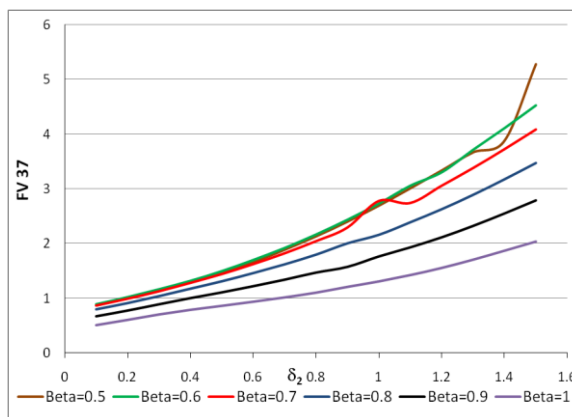


Рис.13 Значения нелинейных вертикальных сил , возникающих при ВК контуров на волнении в зависимости от изменения коэффициента полноты ( $T/b=0,75$ )

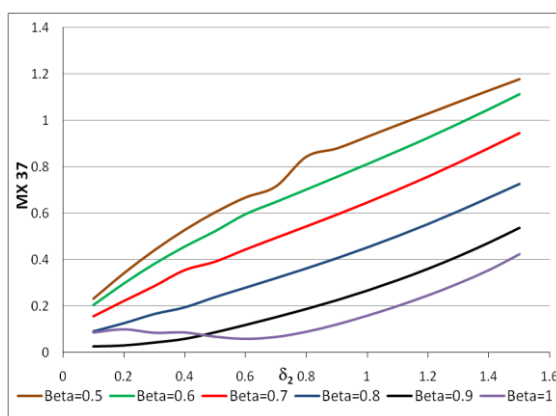


Рис.14 Значения нелинейных моментов , возникающих при ВК контуров на волнении в зависимости от изменения коэффициента полноты ( $T/b=0,75$ )

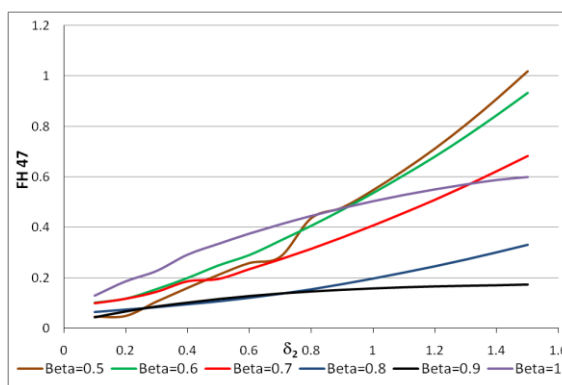


Рис.15 Значения нелинейных горизонтальных сил , возникающих при БК на волнении ( $T/b=0,75$ ) в зависимости от изменения коэффициента полноты.

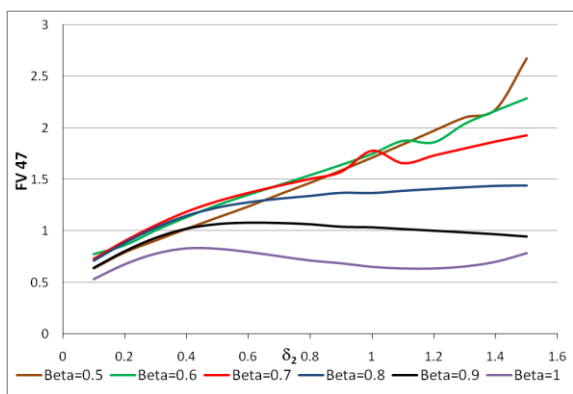


Рис.16 Значения нелинейных вертикальных сил, возникающих при БК контуров на волнении в зависимости от изменения коэффициента полноты ( $T/b=0,75$ ).

Анализ полученных результатов показывает, что нелинейные горизонтальные  $Fh77+$  и вертикальные силы  $Fv77+$  возрастают при уменьшении коэффициента полноты и имеют наибольшие значения для треугольных контуров.

Нелинейные дифракционные моменты для группы контуров с  $T/b=1$  уменьшаются при увеличении коэффициента  $\beta$  от 0.5 до 0.8, затем возрастают при увеличении  $\beta$  от 0.8 до 1 (рис.11). Наибольшие значения моментов имеют место также для треугольных контуров. В случае отношений  $T/b$ , отличных от единицы, нелинейные дифракционные моменты уменьшаются при увеличении коэффициента полноты.

Результаты расчетов нелинейных сил и моментов, возникающих при взаимодействии отдельных видов колебаний с набегающим и дифрагированным волнением в зависимости от изменения коэффициента полноты представлены на рис.12-16

Из приведенных результатов видно, что в случае поперечно-горизонтальных колебаний на волнении нелинейные горизонтальные  $Fh27+$  и вертикальные силы  $Fv27+$  увеличиваются с увеличением коэффициента полноты, достигая наибольших значений для прямоугольных шпангоутов(рис.12).

В случае вертикальных колебаний, наоборот, нелинейные горизонтальные  $Fh37+$  и вертикальные силы  $Fv37+$  увеличиваются при уменьшении коэффициента полноты. Наибольшие значения данных сил имеют место для треугольных контуров, многократно превышая значения для прямоугольных (рис.13)

Нелинейные моменты  $Mx27+$  и  $Mx37+$  при поперечно-горизонтальных и вертикальных колебаниях контуров с отношением осадки к полуширине  $T/b=1$  ведут себя одинаково: уменьшаются при увеличении коэффициента  $\beta$  от 0.5 до 0.8 и увеличиваются при дальнейшем увеличении  $\beta$  от 0.8 до 1. Для контуров с отношением  $T/b$ , отличным от единицы, нелинейные моменты  $Mx37+$  уменьшаются при увеличении коэффициента полноты (рис.14).

В случае бортовых колебаний на волнении нелинейные вертикальные силы  $Fv47+$  как и большинство из рассмотренных вертикальных сил увеличиваются при уменьшении коэффициента полноты (рис.16).

Нелинейные горизонтальные силы  $Fh47+$  и  $Mx47+$ , аналогично рассмотренным ранее силам  $Fh44+$  и  $Mx44+$  [1], уменьшаются при увеличении коэффициента полноты от 0.5 до 0.9 и затем возрастают при дальнейшем увеличении коэффициента (рис.15). Для треугольных и прямоугольных шпангоутов данные силы могут быть соизмеримы.

**Заключение**

Разработанный метод расчета нелинейных сил, обусловленных суммой частот позволяет точно учесть влияние нелинейного граничного условия на свободной поверхности, а также избежать влияния «нерегулярных частот» по сравнению с классическим методом интегральных уравнений.

Проведенное исследование влияния геометрических параметров контуров на нелинейные силы, вызванные отдельными видами колебаний на бихроматическом волнении позволило сделать следующие выводы:

1. В случае поперечно-горизонтальных колебаниях контура происходит увеличение горизонтальных и вертикальных нелинейных сил при увеличении отношения  $T/b$  и коэффициента полноты  $\beta$ .
2. При вертикальных колебаниях увеличение отношения  $T/b$  приводит к увеличению горизонтальных сил и уменьшению вертикальных. Уменьшение коэффициента полноты приводит к увеличению как горизонтальных, так и вертикальных сил, обусловленных суммой частот.
3. В случае бортовых колебаний увеличение отношения  $T/b$  приводит к увеличению горизонтальных сил, а уменьшение коэффициента полноты к увеличению вертикальных сил.
4. При дифракции бихроматического волнения от неподвижного контура увеличение отношения  $T/b$  приводит к увеличению горизонтальных дифракционных сил и к уменьшению вертикальных. Уменьшение коэффициента полноты приводит к увеличению всех действующих сил.
5. Нелинейные моменты, обусловленные суммой частот, в случае всех видов колебаний, а также в случае чисто дифракционной задачи, 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, в настоящей работе и работе авторов [1] выполнен подробный анализ влияния геометрических параметров шпангоутного контура на все возможные составляющие нелинейных сил второго порядка. В дальнейшем, разработанный метод и полученные результаты

могут быть использованы при расчете нелинейных сил, обусловленных суммой частот, и соответствующих амплитуд качки, действующих на судно на основании двумерной нелинейной потенциальной теории

#### Литература

1. Семенова В.Ю., Киав Тхура (2016) Определение нелинейных сил второго порядка, обусловленных суммой частот, возникающих при изолированных поперечно-горизонтальных, вертикальных, бортовых колебаниях контура и их Морские интеллектуальные технологии, N 4(34), стр.65-75
2. Семенова В.Ю. "Разработка метода расчета нелинейной качки судов". Дисс. на соискание уч. степени д.т.н. СПбГМТУ 2005г.
3. Kyozuka Y.(1988) Second-order Wave Forces Acting on a Horizontal Circular Cylinder in Irregular Waves. Nonlinear Water Waves IUTAM Symposium Tokyo/Japan 1987, Springer-Verlag Berlin Heidelberg pp.261-273
4. 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.

#### References

1. Semenova V.Yu., Kiav Tkura (2016) Opredelenie nelineynykh sil vtorogo po-ryadka, obuslovlennykh summoj chastot, voznikayushchikh pri izolirovannykh poperechno-gorizontaľnykh, vertikaľnykh, bortovykh kolebaniyakh kontura i ikh Morskie intellek-tuaľnye tekhnologii, N 4(34), str.65-75
2. Semenova V.Yu. "Razrabotka metoda rascheta nelineynoy kachki sudov". Diss. na soiskanie uch. stepeni d.t.n. SPbGMTU 2005g.
3. Kyozuka Y.(1988) Second-order Wave Forces Acting on a Horizontal Circular Cylinder in Irregular Waves. Nonlinear Water Waves IUTAM Symposium Tokyo/Japan 1987, Springer-Verlag Berlin Heidelberg pp.261-273
4. 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.

УДК 532.5:629.544

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В КОРМОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ СУДНА НА МЕЛКОВОДЬЕ

Шевчук Иван Валентинович

Аспирант кафедры прикладной математики и математического моделирования СПбГМТУ  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: ivan.shevchuk@ymail.com

### Аннотация

Целью статьи является оценка влияния мелководья на гидродинамические возмущающие силы, приводящие к возникновению вибрации, при помощи численных методов. Апробация расчётной методики, основанной на применении современного гибридного RANS/LES метода моделирования турбулентности, проводилась на модели речного судна, движущегося в мелководном канале. Было получено хорошее согласование с результатами измерений поля скорости в следе. Апробированный метод был применён для расчёта номинального следа речного круизного судна, а также обтекания этого судна с вращающимися гребными винтами. Для номинального следа обнаружено заметное увеличение амплитуды пульсаций скорости при уменьшении глубины водоёма за счёт роста скегового вихря. При расчётах работающих винтов зафиксировано повышение интенсивности пульсации сил на винторулевой колонке и давления на корпусе судна при уменьшении отношения глубины к осадке. Показано, что в рассмотренных условиях также вероятно возникновение кавитации на гребных винтах. Рекомендован учёт вклада описанных эффектов в вибрацию кормовой оконечности на стадии проектирования.

**Ключевые слова:** мелководье, метод отсоединённых вихрей, нестационарные эффекты, вибрация, CFD, OpenFOAM, нестационарные нагрузки на винтах, суда внутреннего плавания

## STUDY OF UNSTEADY HYDRODYNAMIC EFFECTS IN THE STERN AREA OF RIVER CRUISERS IN SHALLOW WATER

Shevchuk Ivan Valentinovich

Ph.D. student at the

Chair of Applied Mathematics and Mathematical Modelling, SMTU  
190121, Saint-Petersburg, Lotsmanskaya str. 3  
e-mail: ivan.shevchuk@ymail.com

### Abstract

The main objective of the present paper is the assessment of the influence of shallow water conditions on the hydrodynamic exciters of ship hull vibration using modern hybrid RANS-LES turbulence model. Validation of the computational method was performed for a model of an inland vessel, moving in a shallow channel. Good agreement with PIV measurements for the wake was attained. After the validation the method was applied to analysis of the influence of different factors on the nominal wake characteristics, assessment of thrust fluctuations and pressure pulses and their sensitivity to motion conditions. For the nominal wake significant intensification of the velocity fluctuations was observed, which was caused by the growth of the skeg vortex. Computations with rotating propellers demonstrated, that the depth restriction may influence the periodic forces and moments acting on the ship stern and by these means intensify the vibration. Additionally it was shown, that under investigated conditions cavitation can occur. It is recommended to take the influence of shallow water on vibration exciters into account at the design phase.

**Key words:** shallow water, detached-eddy simulation, unsteady hydrodynamic effects, vibration, вибрация, CFD, OpenFOAM, unsteady propeller loads, inland vessels

### Введение

Одним из наиболее важных параметров при проектировании круизных судов является комфорт пассажиров. В то же самое время, движение речных круизных судов на предельном мелководье зачастую приводит к возникновению вибрации в кормовой оконечности, которая в значительной степени ухудшает условия обитаемости. В связи с этим проектанты вынуждены либо избегать

размещения пассажирских кают в кормовой оконечности и тем самым снижать экономическую эффективность судна, либо применять дополнительные демпфирующие конструкции, повышающие стоимость постройки. Для разработки эффективных технических мер подавления вибрации на мелководье необходимо изучение физических механизмов, приводящих к её



Таблица 1  
 Параметры модели и условия модельных испытаний, рассмотренные в тестовых расчётах

Пар-р	Значение
Bc [M]	9.8
U [м/с]	1.24
h [M]	0.5
T [M]	0.25
h/T [-]	2
Fn [-]	0.12
Fnh [-]	0.56
Re [-]	1.36e+07

Основной причиной возникновения гидродинамически обусловленной вибрации является гребной винт, который воздействует на корпус судна за счёт следующих эффектов: во-первых, силы и моменты, возникающие на вращающемся винте могут осциллировать во времени в виду неоднородности и нестационарности следа и вызывать пульсации сил на валопроводе, во-вторых, вращающиеся лопасти винта создают пульсации давления на корпусе и вызывают колебания обшивки корпуса. В случае возникнове-

ния кавитации пульсации давления на корпусе в значительной степени усиливаются, поэтому в таком случае их можно считать основным источником вибрации [1]. Однако в представленной работе эффект кавитации на возмущающие силы не рассматривается на возмущающие силы не рассматривается. Это обусловлено тем,

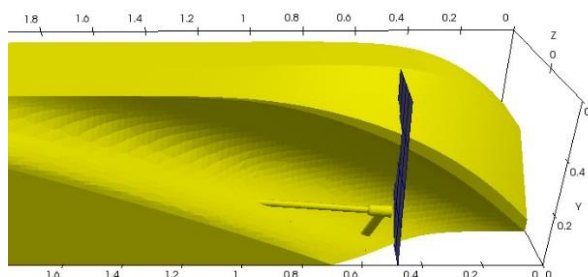


Рис. 1. Форма кормы судна внутреннего плавания, рассмотренного при тестировании расчётной методики

что расчёт кавитации невозможен без точного определения параметров следа. Кроме того, добавление модели кавитации в нестационарный расчёт связано со значительным увеличением трудоёмкости такого расчёта. Так как след в рас

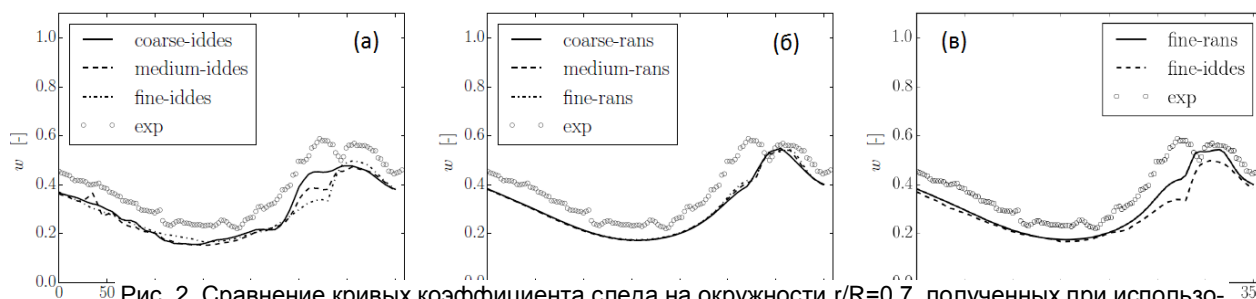


Рис. 2. Сравнение кривых коэффициента следа на окружности  $r/R=0.7$ , полученных при использовании различных методов на сетках различного разрешения (coarse, medium, fine): (а) – SST-IDDES, (б) – SST-RANS, (в) – сравнение гибридного метода и RANS на самой мелкой сетке

смашиваемой задаче может быть существенно нестационарным, предсказание его параметров само по себе является нетривиальной задачей.

На данный момент, метод (U)RANS остаётся наиболее широко применяемым в задачах корабельной гидромеханики. Он обеспечивает достаточную точность при расчётах сопротивления, движения судна на волнении, характеристик гребных винтов и т.п. [2,3]. Однако, для задач, в которых присутствуют нестационарные эффекты, применение URANS зачастую ведёт к снижению точности расчётов [4]. По этой причине в данной работе применяется гибридный RANS/LES метод моделирования турбулентности (метод отсоединённых вихрей [5]).

### 1. Апробация численного метода

Перед применением гибридной модели, предложенной в работе [5] для расчёта течения в кормовой оконечности круизного судна, для которого экспериментальные данные были недоступны, было необходимо протестировать её на схожем течении, чтобы установить, способна ли она обеспечивать удовлетворительную точность при расчёте следа. Для апробации были использованы результаты PIV измерений скорости в плоскости работы винтов для модели мелководном канале, проведённых в Дуйсбургском центре морских технологий и транспортных

систем [6]. Условия модельных испытаний представлены в Таб. 1, где  $B_c$  – ширина опытового бассейна,  $U$  – скорость движения модели,  $h$  – судна представлена на Рис. 1. Модель имела следующие главные размерения:  $L_{oa} = 11\text{м}$ ,  $B = 1.14\text{м}$ ,  $T = 0.25\text{м}$ . Рассматривалась буксировка модели без винтов, причём посадка модели зафиксирована не была. Измерение скорости проводилось в плоскости гребных винтов.

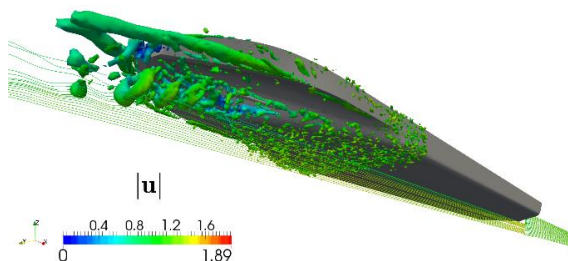


Рис. 3. Вихревые структуры в кормовой оконечности модели M1926, полученные при использовании метода отсоединённых вихрей + ГСТ.

На рисунке можно видеть, в каком месте в применялся ГСТ.

По полученным результатам измерений автором было произведено осреднение поля продольной скорости по ансамблю, после чего было рассчитано поле коэффициента следа  $w = 1 - \langle u_x \rangle / U$ . Экспериментальные значения  $w$  сравнивались с рассчитанными в плоскости винта и на окружности  $r/R=0.7$  (где  $r$  – радиус рассматриваемой окружности, а  $R$  – радиус винта).

В расчётах использовались гибридная модель IDDES-SST а также RANS  $k-\omega$  SST модель. Осреднённые во времени значения поля коэффициента следа, полученные на трёх расчётных сетках (от 3 млн. до 20 млн. ячеек) сравнивались между моделями а также с результатами эксперимента. В расчётах методом IDDES величина шага по времени выбиралась из условия  $Co < 1$  ( $Co$  - число Куранта), что является необходимым условием для получения качественных результатов вихреразрешающими методами. Важным аспектом при использовании этих методов также является наличие в решении турбулентных вихрей. В данной работе данная проблема была решена путём применения генератора синтетической турбулентности (ГСТ) [7]. Генератор применялся в форме источника в уравнении количества движения. Источник располагался на плоскости, перпендикулярной к направлению движения (см. Рис. 3). Статистические параметры поля скорости для генератора были получены из предварительного RANS расчёта. Модель турбулентности SST-IDDES, а также генератор турбулентности были запрограммированы автором в пакете OpenFOAM версии 2.3.x и применялись в решателе pimpleFoam.

глубина воды,  $T$  – осадка судна,  $Fn_h$  - число Фруда по глубине. Форма кормы испытанного

Анализ графиков, представленных на Рис. 2 и 5 позволяет заключить, что рассчитанные обеими моделями (IDDES-SST, RANS-SST) значения коэффициента следа находятся в хорошем согласовании друг с другом а также с результатами PIV измерений. Метод RANS оказывается хорошо применимым для данного течения в связи с тем, что корма рассмотренного судна является хорошо обтекаемой. Тем не менее, форма следа в

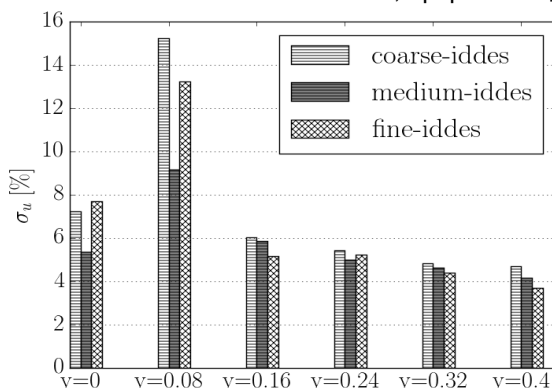


Рис. 4. Сравнение стандартного отклонения (в процентах от скорости модели) в различных точках при варьировании размера расчётных ячеек

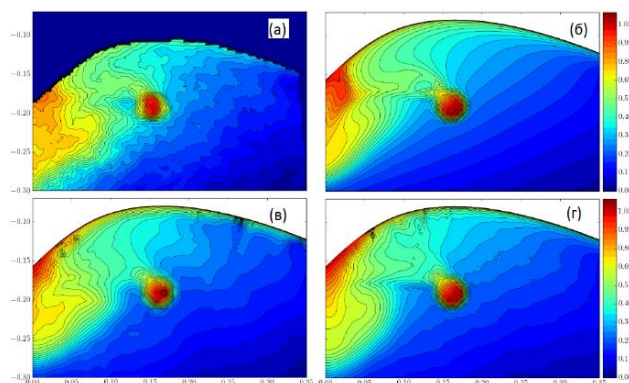


Рис. 5. Коэффициент следа, полученный в эксперименте (а), методом RANS на мелкой сетке(б), методом отсоединённых вихрей на грубой (в) и мелкой (г) сетке.

значительной степени сглаживается. Кроме того, пик коэффициента следа при  $\varphi = 270^\circ$ , наблюдаемый в экспериментальных данных не был воспроизведён. Решение в случае использования RANS-SST оказывается практически независимым от разрешения сетки. Результаты, показанные моделью IDDES-SST в основном идентичны рассчитанным методом RANS, однако в некоторых зонах течения гибридная модель работает лучше, так как предотвращает сглаживание поля скорости. Так, предсказанная ей форма следа оказывается значительно ближе к экспериментальным данным. Также можно заметить, что упомянутый выше пик коэффициента следа

успешно предсказан гибридной моделью на грубой сетке. Можно отметить неожиданное ухудшение результатов IDDES-SST модели при измельчении сетки. Тем не менее хорошее согласование между RANS и IDDES для среднего поля скорости является важным результатом.

Оно показывает, что негативные эффекты, связанные с переходом из RANS режима в LES (такие как искусственный отрыв [8]) в решении отсутствуют. При этом, как можно видеть на Рис. 3, поле скорости полученное при использовании гибридной модели содержит нестационарные вихревые структуры. Это позволит в дальнейшем оценить влияние пульсаций скорости в следе на гребной винт. С этой точки зрения интересно также проанализировать полученное гибридной моделью стандартное отклонение поля продоль-

## 2. Численное исследование течения в кормовой оконечности круизного судна при движении на мелководье

### 2.1 Анализ номинального следа

После апробации методика расчётов (гибридная модель + генератор турбулентности + настройки численного метода) была применена сперва для расчёта обтекания круизного судна ( $L_{oa}=135\text{м}$ ,  $B=12\text{м}$ ,  $T=2\text{м}$ ) в натурном масштабе при движении со скоростью  $U=3\text{м/с}$  на мелководном фарватере при  $h/T=1.25, 1.5, 2.0$ . Были рассмотрены два значения угла дрейфа  $\beta$ :  $0^\circ$  и  $10^\circ$ . Использованное в расчётах количество расчётных ячеек изменялось от 20 млн. до 22 млн. в зависимости от глубины воды. Для того,

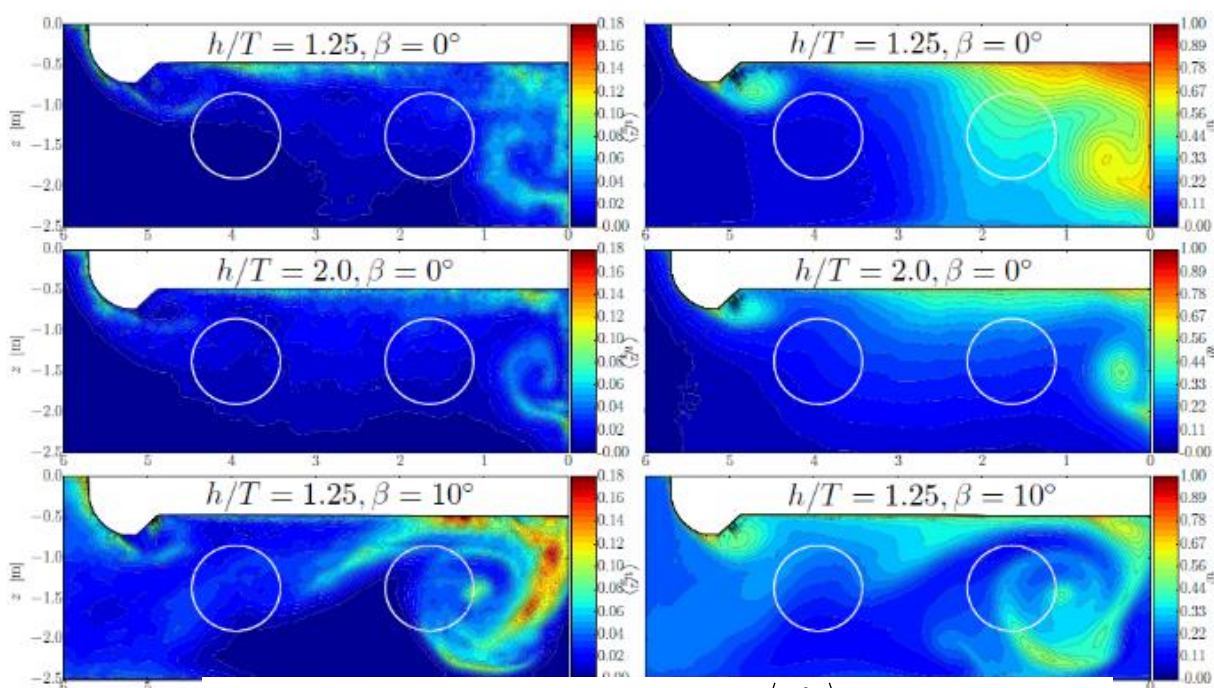


Рис. 6. Разрешённые Рейнольдсовы напряжения  $\langle u'^2_x \rangle$  (слева) и коэффициент следа  $w$  (справа) в плоскости работы винтов круизного судна при различных режимах движения

ной скорости в диске винта  $\sigma_u$  (в процентах от скорости движения модели). Как можно видеть на Рис. 4,  $\sigma_u$  может в значительной степени изменяться на разных сетках ( $y=0, y=0.08$ ), тем не менее в большинстве рассмотренных точек вариации решения между сетками составляют менее 1% от скорости движения модели. Таким образом, по результатам апробации модели можно заключить, что запрограммированная автором версия гибридной модели SST-IDDES хорошо функционирует для рассмотренного течения: она воспроизводит почти идентичные методу RANS результаты для средней скорости, близкие к экспериментальным данным и при этом разрешает наблюдаемые в течении когерентные вихревые структуры.

чтобы повысить точность расчёта в кормовой оконечности применялась однородная сетка с ячейками кубической формы и ребром длиной 0.04м. Генератор турбулентности, как и в описанных выше расчётах применялся на некотором расстоянии от конца цилиндрической вставки корпуса.

На рассматриваемом судне установлены две винторулевые колонки с двумя соосными винтами по каждому борту (см. Рис 6). Колонки рядом со скегом в дальнейшем будут обозначаться как внутренние, а рядом со скулой - как внешние. В расчётах номинального следа проводился анализ нестационарности и неоднородности поля скорости в дисках передних винтов колонок, поскольку изменение следа во времени и пространстве приводит к возникновению периодических сил на винте.

Результаты расчётов номинального следа представлены на Рис. 6. Анализ представленных контурных графиков позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, коэффициент следа в зоне работы внешней колонки намного ниже при всех рассмотренных режимах движения, чем на внутренней. При этом на прямом курсе он оказывается практически не зависящим от глубины фарватера. Однако, для внутренней колонки уменьшение глубины приводит к повышению коэффициента следа, а также усилению его неоднородности. Во-вторых при малых глубинах осцилляции скорости сосредоточены вблизи скега, в то время как в скуловой зоне поле скорости оказывается гораздо более однородным и стационарным. При движении прямым курсом в следе не наблюдается сильных отрывов (на рассмотренном диапазоне глубин). Движение с углом дрейфа приводит к значительному изменению картины течения. В этом случае скеговый вихрь становится гораздо сильнее на малых глубинах, чем на прямом курсе. Амплитуда пульсаций скорости достигает 15-20% в зоне работы внутренней колонки. В то же самое время значение коэффициента следа в этой области уменьшается. Однако коэффициент следа и турбулентная кинетическая энергия вблизи внешней колонки растут по сравнению с  $\beta = 0^\circ$ .

2.2 Анализ течения в кормовой оконечности с работающими винторулевыми колонками

После рассмотрения параметров номинального следа были произведены расчёты течения с вращающимися винтами при описанных выше режимах движения. Винты колонки по левому борту, а также их вращения разрешались напрямую, в то время как по правому борту применялись источники количества движения, моделирующие влияние винтов на течение. На основе записанных при расчёте кривых изменения упора винтов (30с модельного времени) во времени был проведён статистический анализ. Рассматривались максимальная амплитуда пульсации, а также стандартное отклонение. Результаты статистического анализа представлены в Таб. 2 и 3. (обе характеристики приведены в процентах от среднего значения упора). Анализ представленных данных указывает на следующие зависимости. При движении прямым курсом максимальная амплитуда пульсаций и стандартное отклонение упора на внутренней колонке растут при уменьшении глубины, в то время как на внешней колонке наблюдается обратная зависимость для обоих параметров. Это означает, что при уменьшении глубины осцилляции упора проявляются сильнее на внутреннем винте, а при увеличении глубины – на внешнем. Движение с углом дрейфа приводит к уменьшению обоих рассмотренных статистических параметров на первом и на втором винте. Этому можно дать следующее объяснение: при движении с углом дрейфа турбулентные вихри, возникающие в пограничном слое судна сносятся под углом и таким образом не попадают напрямую в зону работы

винторулевых колонок. В то же время на прямом курсе вся сгенерированная на корпусе турбулентность непосредственно попадает в диски винтов. Анализ пульсаций давления на корпусе судна над работающими винтами показал, что амплитуда осцилляций увеличивается с 3 до 7 кПа (при  $\beta = 0^\circ$ ) и до 8 кПа (при  $\beta = 10^\circ$ ) по мере уменьшения отношения  $h/T$  с 2.0 до 1.25. Этот эффект выражен в равной степени для обоих винтов. Несмотря на то, что в проведённых расчётах кавитация не моделировалась тот факт, что в случае её возникновения пульсации давления на корпусе могут в значительной степени возрасти заслуживает внимания. Поэтому для того, чтобы оценить, может ли в рассматриваемой конфигурации возникнуть кавитация и каков её характер, был проведён апостериорный анализ зон на лопастях гребных винтов, в которых давление опускается ниже давления насыщенного пара.

Результаты анализа приведены на Рис. 7 для различных условий движения.

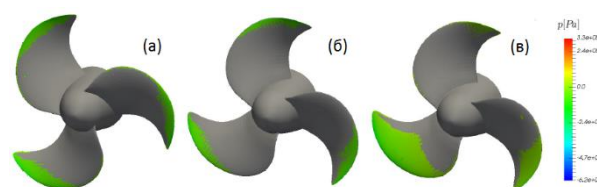


Рис. 7. Зоны вероятного возникновения кавитации при  $h/T = 1.25, \beta = 0^\circ$  (а),  $h/T = 2.0, \beta = 0^\circ$  (б),  $h/T = 1.25, \beta = 10^\circ$  (в).

Представленная на Рис. 7 визуализация зон пониженного давления указывает на то, что во всех рассмотренных режимах движения винт может кавитировать. При этом величина зон возникновения кавитации увеличивается при уменьшении  $h/T$ . На прямом курсе размер областей пониженного давления приблизительно одинаков для всех лопастей. Однако при движении с углом дрейфа размер зон возникновения кавитации в значительной степени изменяется при повороте лопасти. Это обусловлено работой винтов в скошенном и вытекающей из этого зависимостью угла атаки лопасти от её положения. Таким образом, становится возможным периодическое схлопывание каверн, которое будет вызывать очень сильные пульсации давления. Такой сценарий возникновения вибрации на мелководье описан в работе [9].

**Заключение**

Представленные в статье результаты численного исследования течения в кормовой оконечности круизного судна на мелководье позволяют сделать вывод, что нестационарные гидродинамические эффекты в значительной степени усиливаются при уменьшении отношения глубины к осадке. В номинальном следе обнаружен рост амплитуды пульсаций скорости а также неравномерности поля скорости. Расчёты обтекания судна с

работающими винторулевыми колонками показали усиление осцилляций упора (для внутренней колонки на прямом курсе и для обеих колонок при дрейфе) и рост амплитуды пульсаций давления на корпусе с 3 до 7-8 кПа при уменьшении глубины фарватера. Наконец, апостериорный анализ давления на лопастях винтов указывает на высокую вероятность возникновения кавитации. Таким образом, все из рассмотренных гидродинамических возмущающих сил, вносящих вклад в возникновение вибрации показывают тенденцию к усилению при уменьшении глубины воды. По описанным выше причинам рекомендован учёт влияния мелководья на вибрацию кормовой око-

нечности на стадии проектирования. Для этого может применяться использованная в представленном исследовании методика расчётов.

Таблица 2

Статистические параметры суммарного упора на внутренней (1) и внешней (2) колонках при движении прямым курсом

h/T	1.25		1.5		2.0	
	1	2	1	2	1	2
Колонка	1	2	1	2	1	2
Макс.ампл.	4.05	5.15	3.33	4.63	3.79	5.53
Стд. откл.	1.34	2.08	0.90	1.96	1.20	2.12

Таблица 3

Статистические параметры суммарного упора на внутренней (1) и внешней (2) колонках при движе-

h/T	1.25		1.5		2.0	
	1	2	1	2	1	2
Колонка	1	2	1	2	1	2
Макс. ампл.	5.78	5.07	5.25	5.19	5.05	6.55
Стд. откл.	2.44	2.07	2.26	2.42	2.20	2.86

нии с углом дрейфа 10°

Литература  
References

1. W. S. Vorus and J. R. Paulling. *Vibration*. The Principles of Naval Architecture Series. Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.
2. L. Larsson, F. Stern, and M. Visonneau. *Gothenburg 2010 - a workshop on numerical ship hydrodynamics*. In *Proceedings*. vol. 2. Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chalmers University of Technology, 2010.
3. J. Binns, R. Brown, and N. Bose. *Proceedings Of The Third International Symposium on Marine Propulsors*. Australian Maritime College, University of Tasmania, 2013.
4. J. Fröhlich and D. von Terzi. *Hybrid LES/RANS Methods for the Simulation of Turbulent Flows*. Progress in Aerospace Sciences, 44:349-377, 2008.
5. M. Griškevič, A. Garbaruk, J. Schütze, and F. Menter. *Development of DDES and IDDES Formulations for the k-omega Shear Stress Transport Model*. Flow, Turbulence and Combustion, 88(3):431-449, 2011.
6. S. List, K. Rügner, and B. Friedhoff. *WAKE. An veränderliche Wassertiefen angepasste Konzepte zur Energiesparung durch Vergleichmäßigung des Propellerzustroms*. Bericht 2162., 2015.
7. D. Y. Adamian and A. K. Travin. *Assessment of an approach to generating inow synthetic turbulence for large eddy simulations of complex turbulent flows*. Progress in Flight Physics, 5:43-54, 2013
8. P. R. Spalart, S. Deck, M. L. Shur, K. D. Squires, M. Kh. Strelets, and A. Travin. *A New Version of Detached-eddy Simulation, Resistant to Ambiguous Grid Densities*. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 20(3):181-195, 2006.
9. F. E. Reed and N. L. Bassett. *Further Studies of Propeller-Excited Vibration on Great Lakes Cargo Ships*. SNAME Transactions, 97:375-396, 1989.

УДК 629.5.035.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КАВИТАЦИИ В ПАКЕТЕ OPENFOAM

**Ткаченко Игорь Вячеславович**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой гидроаэродинамики и морской акустики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: igor.v.tkachenko@mail.ru

**Чепурко Сергей Иванович**

ассистент кафедры гидроаэродинамики и морской акустики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: chep\_s\_i@mail.ru

### Аннотация

Целью работы являлось исследование возможностей открытого пакета OpenFOAM в области моделирования пленочной кавитации на лопастях судовых движителей. Описание турбулентного течения жидкости осуществлялось на основе уравнений Рейнольдса, с использованием стандартной  $k-\epsilon$  модели турбулентности для их замыкания. Граница раздела между двумя средами моделировалась с помощью метода VoF. Для верификации расчетного метода были определены коэффициенты упора и момента на винтах серии В без учета кавитации. Результаты численных расчетов показали хорошее согласование с экспериментальными данными вне зависимости от конфигурации движителя. Численное моделирование кавитации на лопастях было выполнено для винта INSEAN E779A. В ходе численных экспериментов было проведено сопоставление двух моделей кавитации: Кунца и Зауэра. Форма каверны, полученная в расчетах, была сопоставлена с экспериментальными данными. Анализ показал, что модель Зауэра более точно описывает форму каверны на лопасти винта, в отличие от модели Кунца.

**Ключевые слова:** движители, кавитация, вычислительная гидродинамика, OpenFOAM, турбулентность, Кунц, Зауэр, E779A.

## CAVITATION MODELLING IN OPENFOAM.

**Tkachenko Igor Vyacheslavovich**

the professor, Dr.Sci.Tech.,  
the head of department of hydro aerodynamics  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: igor.v.tkachenko@mail.ru

**Chepurko Sergey Ivanovich**

the assistant of department of hydro aerodynamics  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: chep\_s\_i@mail.ru

### Abstract

The aim of the study was to investigate the capabilities of the non-commercial CFD software OpenFOAM in ship propeller cavitation modeling. The URANS approach with standard  $k-\epsilon$  model was used for simulation of turbulence. The interface between two phases was described with Volume of Fluid method (VoF). In order to verify the numerical approach the coefficients of forces and moments on two B-series propellers were calculated without cavitation. The results of numerical calculations were compared with experimental data and showed good agreement regardless the propeller configuration. Numerical simulation of cavitating flow around the INSEAN E779A propeller was carried out. During the numerical experiments the validation of Kunz mass-transfer model and Sauer model were performed. Obtained cavity shapes were compared with experimental data. The analysis showed that the Sauer model predict the shape of cavity more accurate, while the Kunz model decreases the cavity area.

**Key words:** propeller, cavitation, CFD, OpenFOAM, turbulence, Kunz, Sauer, E779A.

**Введение**

В судостроении разрыв сплошности среды, т.е. кавитация, возникает на лопастях судовых движителей и рулях. В общем случае наблюдаются четыре вида кавитации: пузырьковая, вихревая, пленочная и суперкавитация. В корабельной гидромеханике естественная кавитация негативное явление, требующее особого внимания. Вредные последствия, характерные для различных видов кавитации, включают эрозию, вибрацию, шум и падение упора на винте.

Численное моделирование кавитации необычайно сложно. Прежде всего это связано с отсутствием четкого понимания сути физического процесса. Во-вторых, в нюансах современных моделей, которые требуют задания распределение ядер кавитации и их размер. Вот почему достигнуты успехи только в случае простейших форм кавитации, например, в случае частичной пленочной кавитации.

На сегодняшний день пакет OpenFOAM достаточно широко применяется для моделирования кавитационных течений: в канале турбин, за телами, на крыльях и лопастях движителей. Анализ литературы показывает, что в этом пакете реализовано несколько моделей кавитации, позволяющие моделировать пузырьковую, пленочную и суперкавитацию. С помощью этого пакета были исследованы кавитация на головной части цилиндрического тела [1], кавитация на крыле NACA0015 [1], кавитация на крыле Delft Twist11 [1] и кавитация на лопастях движителя INSEAN E779A [7], влияние распределения зародышей кавитации на её формирование в модели Зауэра [5]. Результаты работ показали хорошее согласование с экспериментальными данными.

В настоящей работе рассматривается возможность моделирования пленочной кавитации ан судовых движителях в открытом некоммерческом пакете OpenFOAM с помощью двух известных моделей кавитации: Зауэра и Кунца.

**1. Математическая постановка задачи о кавитационном течении жидкости**

В OpenFOAM для моделирования кавитационных течений используются основные уравнения движения вязкой жидкости: уравнение неразрывности, уравнения Навье-Стокса, метод объёма жидкости и модели массопереноса. Для получения осреднённых аналогов уравнений движения жидкости в настоящей работе используются подход Рейнольдса.

*Основные уравнения движения вязкой жидкости.* В общем случае движение вязкой жидкости можно описать с помощью уравнений неразрывности и Навье-Стокса

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i \tag{2}$$

где  $u_i$  -  $i$ -я компонента мгновенного вектора скорости и  $x_i$  - декартовы координаты,  $i=1,2,3$ ;  $p$  - мгновенное давление,  $\rho$  - плотность жидкости,  $\nu$  - кинематическая вязкость жидкости,  $g_i$  - вектор ускорения свободного падения.

*Уравнения Рейнольдса.* В основе подхода Рейнольдса лежат осреднённые по временному интервалу уравнение неразрывности и уравнения Навье-Стокса, которые в отечественной литературе известны как уравнения Рейнольдса. Для несжимаемой несжимаемой жидкости уравнения принимают вид

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \langle u_i \rangle}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \langle u_i' u_j' \rangle}{\partial x_j} + g_i \tag{4}$$

Здесь  $\langle * \rangle$  - осредненные по Рейнольдсу величины,  $-\langle u_i' u_j' \rangle$  - тензор напряжений Рейнольдса (турбулентных напряжений), которые должны моделироваться (замыкаться).

В основе большинства URANS моделей лежат два важных предположения: (1) гипотеза о локальной изотропности турбулентных течений, предложенная А.Н. Колмогоровым, которая справедлива для высоких чисел Рейнольдса, и (2) градиентно-диффузионная гипотеза, согласно которой напряжения Рейнольдса описываются зависимостью

$$-\langle u_i' u_j' \rangle = -2\nu_t \langle S_{ij} \rangle \tag{5}$$

$$\langle S_{ij} \rangle = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) \tag{6}$$

где  $\nu_t$  - турбулентная вязкость;  $\langle S_{ij} \rangle$  - сдвиговая скорость.

Для замыкания системы уравнений в настоящей работе используется  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности, согласно которой, турбулентная вязкость  $\nu_t$  определяется зависимостью:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

где  $k$  - кинетическая энергия турбулентности;  $\epsilon$  - скорость диссипации;  $C_\mu$  - некоторая константа, принимаемая равной 0,09.

Неизвестные функции  $k$  и  $\epsilon$  находятся из решения дифференциальных уравнений переноса кинетической энергии и диссипации.

**Метод объёма жидкости.** Метод объёма жидкости относится к методам фиксации поверхности раздела двухфазных сред. Он нашел широкое применение в коммерческих пакетах и был предложен Хиртом и Николсом [2]. Положение интерфейса (поверхности раздела двух сред) в VoF определяется процентом жидкости в расчётной ячейке – объёмной фракцией жидкости  $\alpha_q$ .

Если  $\alpha_q = 1$ , то ячейка заполнена жидкостью.

Если  $0 < \alpha_q < 1$ , то в ячейке располагается граница раздела сред. Если  $\alpha_q = 0$ , то ячейка заполнена воздухом. Объёмная фракция должна удовлетворять соотношению

$$\sum_q \alpha_q = 1 \tag{7}$$

Плотность и кинематическая вязкость, входящие в уравнения Навье-Стокса, определяются линейными зависимостями

$$\rho = \sum_q \alpha_q \rho_q \tag{8}$$

$$\nu = \sum_q \alpha_q \nu_q \tag{9}$$

Значения  $\alpha_q$  находится из решения транспортного уравнения

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_j \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_j} = 0 \tag{10}$$

В случае кавитационных течений уравнение 11 модифицируется. В правую часть вводится источниковый член

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_j \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_j} = \frac{\dot{m}}{\rho_v} \tag{11}$$

где  $\dot{m}$  – скорость массопереноса,  $\rho_v$  – плотность насыщенного пара.

**Модели массопереноса.** В OpenFOAM на сегодняшний день реализованы модели массопереноса Кунца и Зауэра.

В модели Кунца [3] скорость парообразования  $\dot{m}^+$  моделируется пропорционально отношению давления пара к общему давлению в точке и количеству жидкости в смеси, а скорость конденсации пара  $\dot{m}^-$  основана на функции объёма газа

$$\dot{m}^+ = A^+ \rho_v (1 - \alpha) \frac{\min[0, p - p_v]}{\frac{1}{2} \rho_l U^2} \tag{12}$$

$$\dot{m}^- = A^- \rho_v (1 - \alpha) \alpha^2 \tag{13}$$

Суммарная скорость массопереноса определяется, как  $\dot{m} = \dot{m}^+ - \dot{m}^-$ ,  $A^+$  и  $A^-$  – эмпирические константы.

В подходе, предложенном Зауэром [4], изменение объёмной доли пара зависит не только от размера пузырька, но и от их количества, и определяется соотношением:

$$\frac{d\alpha}{dt} = (1 - \alpha) \frac{\frac{4}{3} \pi R_b^3 n_0}{1 + \frac{4}{3} \pi R_b^3 n_0} \frac{dR_b}{dt} \tag{14}$$

где  $R_b$  – радиус пузырьков.

Используя упрощённое уравнение Релея для определения  $\frac{dR_b}{dt}$

$$\frac{dR_b}{dt} = -\text{sign}(p - p_v) \sqrt{\frac{2 |p - p_v|}{3 \rho_l}} \tag{15}$$

получаем

$$\dot{m} = -\rho_v (1 - \alpha) \frac{3\alpha}{R_b} \text{sign}(p - p_v) \sqrt{\frac{2 |p - p_v|}{3 \rho_l}} \tag{16}$$

где  $R_b$  определяется из выражения

$$R_b = \left( \frac{1}{\frac{4}{3} \pi n_0} \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right)^{1/3} \tag{17}$$

## 2. Численная аппроксимация уравнений движения вязкой жидкости

Для численного решения задачи в пакете OpenFOAM используется метод контрольного объёма, в основе которого лежит интегрирование уравнений по подобласти – конечному контрольному объёму

В данной работе, при определении интегральных характеристик движителей использовался стандартный решатель pimpleDyMfoam, в то время как для моделирования кавитации использовался решатель interPhaseChangeDyMfoam. PimpleDyMfoam и interPhaseChangeDyMfoam – нестационарные решатели для несжимаемой ньютоновской жидкости с возможностью использования динамических сеток. В основе



решателей лежит алгоритм PIMPLE (PISO-SIMPLE), совмещающий возможности SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) и PISO (Pressure Implicit with Splitting the Operators) алгоритмов.

Вращение винта моделируется путём вращения части сетки с использованием AMI (Arbitrary Mesh Interface) граничных условий на границе вращающейся и неподвижной области. Передача информации между подвижной и неподвижной частью осуществляется путем интерполяции значений переменных, что позволяет использовать сетки различной топологии на границе этих двух областей. Топология расчетной сетки, использованной в данной работе, представлена на рис. 1.

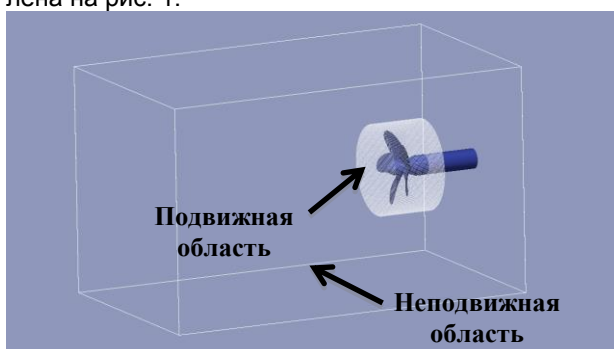


Рис. 1. Разбиение расчетной сетки на подобласти

### 3. Результаты численного моделирования

#### 3.1 Расчет ГДХ винтов серии В без учета кавитации.

Для верификации расчетного метода, был произведен расчет интегральных характеристик двух пятилопастных винтов серии В. В рассмотрение был взят винт В5-60 с дисковым отношением  $A_d = 0.6$  и шаговым отношением  $P/D = 0.6$ , и винт В5-75 с дисковым отношением  $A_d = 0.75$  и шаговым отношением  $P/D = 1$ . В случае винта В5-60 расчеты проводились для поступей  $J = 0.1; 0.3; 0.5$ , а в случае В5-75 – для поступей  $J = 0.7; 0.8; 0.9; 1$ .

Коэффициенты сил и моментов рассчитывались по следующим зависимостям:

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (18)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^4} \quad (19)$$

где  $T$  – упор винта;  $Q$  – крутящий момент;  $n$  – частота вращения винта;  $D$  - диаметр винта.

Результаты расчетов ГДХ винта В5-60 и экспериментальные данные [8] представлены на рис. 3.

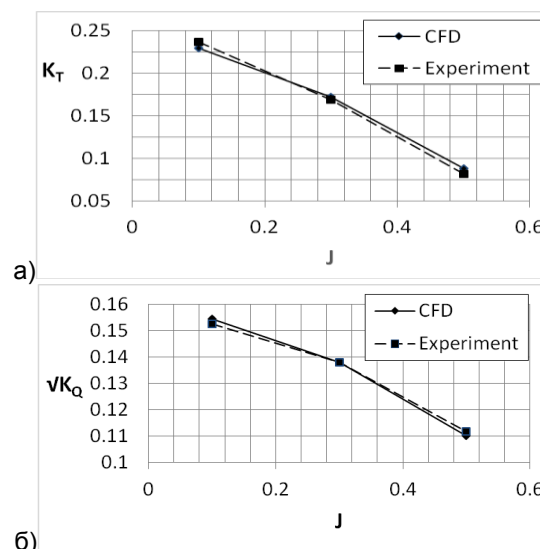


Рис. 2. Коэффициент упора и момента винта В5-60. а – коэффициент упора; б – коэффициент момента.

Результаты расчетов ГДХ винта В5-75 сопоставлены с экспериментальными данными [6] и представлены на рис. 4.

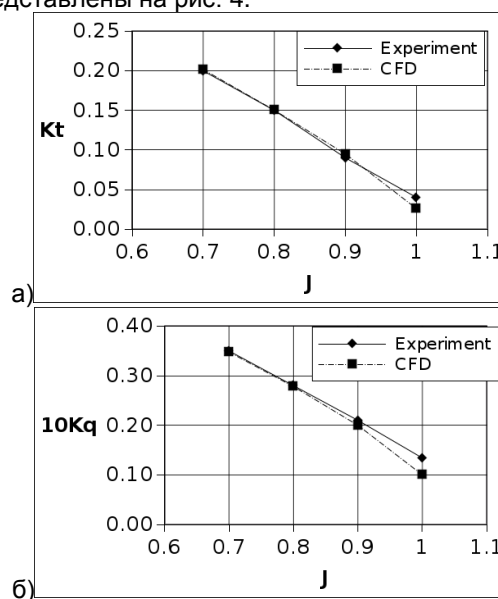


Рис. 4. Коэффициент упора и момента винта В5-75. а – коэффициент упора; б – коэффициент момента.

Анализ рисунков показывает, что вне зависимости от геометрии винта силы и моменты, полученные с помощью OpenFOAM, хорошо согласуются с экспериментальными данными как по упору, так и по моменту.

#### 3.2 Расчет винта E779A с учетом кавитации.

Для оценки возможностей пакета OpenFOAM предсказывать кавитацию на лопастях судовых движителей, было проведено моделирование работы винта INSEAN E779A, с дисковым отношением  $A_d = 0.689$  и шаговым отношением

$P/D=1.1$ . Расчеты выполнялись для поступи  $J = 0.1$  и числа кавитации  $\sigma = 1,763$ , с помощью двух моделей кавитации: Кунца и Зауэра. В модели Зауэра плотность распределения зародышей кавитации составила  $n_0 = 1.6 \cdot 10^{13} 1/м^3$ , а их радиус  $R_b = 1 \cdot 10^{-6} м$ .

На рис 4 представлена форма каверны на засасывающей стороне лопасти винта E779A, полученная расчетным путем и экспериментально.

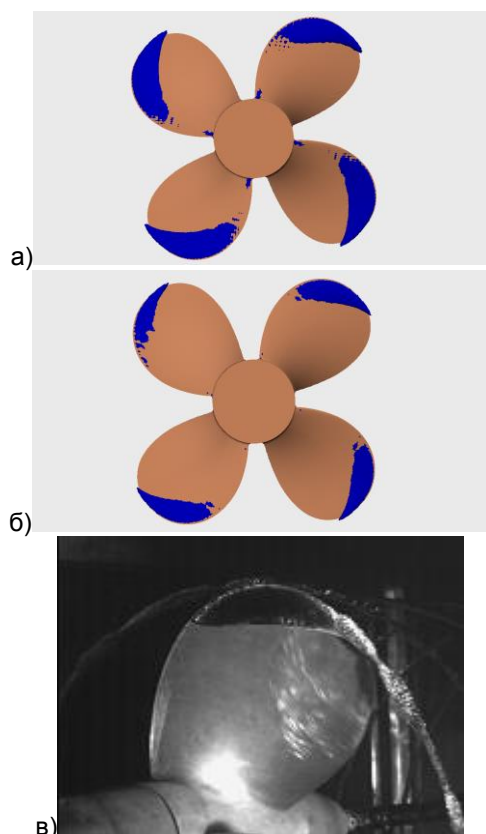


Рис. 4. Форма каверны на лопасти винта E779A. а – модель Зауэра; б – модель Кунца; в - эксперимент [7].

Можно утверждать, что форма каверны полученной с помощью модели Зауэра лучше согласуется с экспериментальными данными, чем форма каверны, полученная с помощью модели Кунца. Модель Кунца занижает площадь пленочной кавитации. К сожалению, обе модели не позволили разрешить вихревую кавитацию, сходящую с торцов лопастей, отчетливо наблюдаемую в эксперименте.

### Заключение

В работе была рассмотрена возможность моделирования пленочной кавитации на лопастях гребного винта в пакете OpenFOAM. Для верификации расчетного метода были рассчитаны силы и моменты на двух винтах серии В без учета кавитации. Полученные значения коэффициентов упора и момента показали хорошее согласование

с экспериментальными данными. Также была рассчитана кавитация на лопастях винта E779A с помощью моделей Кунца и Зауэра. Сопоставление формы полученных каверн с экспериментальными данными, показало, что модель Зауэра дает форму каверны более близкую к экспериментальной, чем модель Кунца, занижающая площадь пленочной кавитации.

**Литература**

1. Bensow R., Bark G. Simulating cavitating flows with LES in OpenFOAM. Eccomas CFD 2010, Lisbon, Portugal, 2010, pp. 14-17.
2. Hirt C.W., Nichols B.D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J. of Comp. Physics, 39(1), pp. 201-225.
3. Kunz R.F., Boger D.A., and Stinebring D.R. (2000). A preconditioned Navier-Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction. Computers and Fluids, 29(8) pp. 849-875.
4. Sauer J. Instationaeren kaviterende Stroemung – Ein neues Modell, basierend auf Front Capturing (VoF) and Blasendynamik. Universitaet Karlsruhe, PhD thesis, 2010.
5. Vallier A. Eulerian and Lagrangian cavitation related simulations using OpenFOAM. Lund University, Sweden, PhD thesis, 2010.
6. Van Lammeren W. P. A., Oosterveld M. W. C. (1969). The Wageningen B-screw Series. Nederlands Scheepsbouwkundig Proefstation, p. 43.
7. Vaz G., Hally D., Huuva T. Cavitating Flow Calculations for the E779A Propeller in Open Water and Behind Conditions: Code Comparison and Solution Validation Fourth International Symposium on Marine Propulsors Austin, Texas, USA, 2015.
8. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля: в трёх томах. Том 1. Л.: Судостроение, 1985.

**References**

1. Bensow R., Bark G. Simulating cavitating flows with LES in OpenFOAM. Eccomas CFD 2010, Lisbon, Portugal, 2010, pp. 14-17.
2. Hirt C.W., Nichols B.D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J. of Comp. Physics, 39(1), pp. 201-225.
3. Kunz R.F., Boger D.A., and Stinebring D.R. (2000). A preconditioned Navier-Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction. Computers and Fluids, 29(8) pp. 849-875.
4. Sauer J. Instationaeren kaviterende Stroemung – Ein neues Modell, basierend auf Front Capturing (VoF) and Blasendynamik. Universitaet Karlsruhe, PhD thesis, 2010.
5. Vallier A. Eulerian and Lagrangian cavitation related simulations using OpenFOAM. Lund University, Sweden, PhD thesis, 2010.
6. Van Lammeren W. P. A., Oosterveld M. W. C. (1969). The Wageningen B-screw Series. Nederlands Scheepsbouwkundig Proefstation, p. 43.
7. Vaz G., Hally D., Huuva T. Cavitating Flow Calculations for the E779A Propeller in Open Water and Behind Conditions: Code Comparison and Solution Validation Fourth International Symposium on Marine Propulsors Austin, Texas, USA, 2015.
8. Vojtkunskij Ja.I. Spravochnik po teorii korablja: v trjoh tomah. Tom 1. L. Sudostroenie, 1985.

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

УДК 629.12.001.2

### **О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО (E – LEARNING) И МОБИЛЬНОГО (M – LEARNING) ОБУЧЕНИЯ**

**Васильева Наталья Викторовна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3,  
e-mail: nww13@mail.ru

**Григорьев-Голубев Владимир Викторович**

кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры математики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3,  
e-mail: grig\_golubev@mail.ru

**Евграфова Ирина Владимировна**

кандидат педагогических наук, доцент кафедры математики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: spbmtu@yandex.ru

#### **Аннотация**

Статья посвящена актуальной проблеме современного образования — разработке приложений для электронного обучения, а также для набирающего в последние годы все большую популярность мобильного обучения.

Использование в учебном процессе электронных учебных материалов, предназначенных для электронных устройств: компьютеров, ноутбуков, и т.д. способствует организации самостоятельной работы обучающихся, доля которой в современном образовании очень велика. Привлечение же к учебному процессу беспроводных мобильных устройств (планшетов, смартфонов) существенно расширяет аудиторию обучающихся, поскольку большинство располагает мобильными устройствами с возможностью выхода в Интернет, которые к тому же приносятся на занятия.

Используемые в учебном процессе электронные материалы, представляют собой web – продукты, разрабатываемые на платформе HTML и Java Script. Поэтому они должны удовлетворять общеизвестным требованиям, предъявляемым к любому web – продукту, так называемым принципам юзабилити (удобства пользования) [1], которые хорошо известны любому web – программисту.

Формат приложений определяется спецификой устройств, для которых они предназначены. Приложения для компьютера должны учитывать особенности гипертекста, использовать понятный без дополнительных инструкций интерфейс, допускать возможность создания элементов поиска. При разработке контента для мобильных устройств должны быть учтены их технические возможности: небольшой экран и ограниченная возможность ввода данных.

Авторы работы сделали попытку объединить основные компоненты приложений для электронного и мобильного обучения, относящихся к математическим дисциплинам: математику, методике преподавания и элементы web – программирования в один: компьютерную математику. В статье приводятся основные требования, которые должны быть учтены при разработке таких приложений, обсуждается их эффективность и методы повышения эффективности.

В качестве наглядных примеров демонстрируется структура, дизайн и интерфейс электронных учебных материалов по математическим дисциплинам, использующихся и разрабатываемых кафедрой математики Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (СПбГМТУ) [2,3].

**Ключевые слова:** математика, мобильное обучение, электронное обучение, юзабилити, учебные материалы, интерфейс, электронные учебники, контент для мобильных приложений.

## ON IMPROVING THE EFFECTIVENESS OF SOFTWARE FOR ELECTRONIC (E – LEARNING) AND MOBILE (M – LEARNING) TRAINING

**Vasilieva Natalia Viktorovna,**

candidate of technical Sciences, associate Professor, Department of mathematics  
Saint-Petersburg state marine technical University,  
190121, Saint-Petersburg, street Pilot, 3,  
e-mail: nww13@mail.ru.

**Grigorev-Golubev Vladimir Viktorovich,**

candidate of physico-mathematical Sciences, associate Professor, Professor, Department of mathematics,  
Saint-Petersburg state marine technical University  
190121, Saint-Petersburg, street Pilot, 3,  
e-mail: grig\_golubev@mail.ru.

**Evgrafova Irina Vladimirovna**

the candidate of pedagogical Sciences, Department of mathematics,  
Saint-Petersburg state marine technical University,  
190121, Saint-Petersburg, street Pilot, 3.  
e-mail: spbmtu@yandex.ru.

### Abstract

Article is devoted an actual problem of modern education — development of applications for e-learning, as well as to obtain in recent years, with the popularity of mobile learning.

The use in the educational process of e-learning materials for electronic devices: computers, laptops, etc. contributes to the organization of independent work of students, the share of which in modern education is very high. Involvement in the educational process of wireless mobile devices (tablets, smart phones) significantly expands the audience of students, since most features of mobile devices with access to the Internet, which also brought to class.

The instructional materials are web – products developed on the platform of HTML and Java Script. Therefore, they must meet the known requirements for any web – product, the so-called principles of usability (ease of use) [1], which is well known to any web programmer.

Application format is determined by the specifics of the devices for which they were intended. Application for a computer should take into account the peculiarities of Hypertext, use is understood the without additional instructions interface, allow the creation of search elements. When developing content for mobile devices should take into account their technical ability: small screen and limited ability to input data.

The authors have attempted to combine the major components applications for electronic and mobile learning, related to mathematical disciplines: mathematics, methods of teaching and elements of web – programming in one: computer mathematics. The article presents the basic requirements that should be taken into account when developing such applications, discusses their effectiveness and methods to improve efficiency.

As illustrative examples demonstrate how to structure, design and interface of e-learning materials in the mathematics used and developed by the Department of mathematics Saint-Petersburg state marine technical University (Spbgmtu) [2, 3].

**Keywords:** mathematics, mobile learning, e-learning, usability, learning materials, interface, e-books, content for mobile applications.

### Введение

В современном информационном обществе, в котором растет зависимость от средств связи и доступа к информации, электронные и беспроводные мобильные устройства не будут преходящим явлением. Поскольку мощность и возможности их постоянно растут, то они могут шире использоваться в качестве образовательных инструментов и в итоге занять центральное место в образовании. По этим причинам в ЮНЕСКО считают, что возможности электронного и мобильного обучения должны быть тщательно изучены органами управления образованием [4].

Высокая эффективность использования в учебном процессе электронных (компьютеры,

ноутбуки) и мобильных (планшеты, смартфоны) средств обучения обусловлена:

- их компактностью и мобильностью, позволяющей легко и быстро находить нужную информацию;
- их динамичностью и наглядностью при представлении нужной информации (анимация, видео ролики, и.т.д.);
- возможностью объективного контроля и оценки уровня знаний обучающегося посредством тестирования с жестко предписанной системой оценивания;
- возможностью оперативной обратной связи между преподавателем и обучающимся.

Несмотря на широкое распространение и доступность беспроводных мобильных устройств

среди обучающихся, мобильное обучение слабо распространено в отечественных вузах, как, впрочем, и электронное. Хотя учебный процесс может быть очень эффективным и интересным при сочетании различных форм обучения, при так называемом смешанном обучении, включающем в себя преимущества различных его форм. Такое смешанное обучение создает интерактивную образовательную среду, в которой:

- имеется возможность мобильной связи и обмена информацией между обучающимися и преподавателем;
- обеспечивается доступ обучающихся к методическим материалам изучаемой дисциплины в любое удобное время и в любом месте;
- предоставляется возможность контроля и проверки преподавателем уровня усвоения учебного материала академической группой.

### 1. Принципы юзабилити учебных электронных ресурсов

Для интерфейса электронных учебных ресурсов основными критериями юзабилити (удобства) являются:

- принцип минимизации;
- принцип единообразия;
- принцип информированности о состоянии системы;
- соответствие текста и формата устройства, для которого он предназначен.

Первый принцип призывает избавляться от избыточности в тексте и в элементах дизайна. Текст должен быть лаконичным и емким и приведен в соответствие с используемым форматом представления, т.е. содержание и форма подачи текста должны составлять одно целое.

Согласно второму принципу в электронной книге не нужно бояться повторов. Наоборот каждый термин и каждое понятие должны повторяться единообразно во всем учебнике. Это способствует быстрому и устойчивому запоминанию основных понятий, облегчает навигацию по страницам учебника, дает возможность внедрения в учебник поисковой системы.

Принцип информированности о состоянии системы, применительно к электронному учебнику, означает возможность быстро и легко найти нужную информацию, так называемый «дружественный интерфейс» web – продукта. Это означает, что структура электронного ресурса и система навигации понятна с первого взгляда, а используемые ссылки и кнопки легко распознают-

ся. Кроме того, пользователь должен всегда четко понимать, где находится нужная информация, и какой раздел учебника он в настоящее время просматривает.

Соответствие текста и формата устройства, для которого этот текст разработан, означает учет всех технических возможностей электронного или мобильного устройства: размеры его экрана, принцип доступа к электронным материалам, и.т.д., т.е. текст и его формат должны представлять единое целое.

## 2. Учебные программные продукты

### 2.1. Электронная версия

Согласно принципу минимизации, длинный текст должен быть разбит на маленькие фрагменты, которые уместятся на одном экране и не требуют большой прокрутки. В связи с этим весь учебный материал для электронного и мобильного обучения требует построения всего образовательного процесса на основе принципиально другой, модульной структуры. Подобная структура учебного материала позволяет разбивать каждый модуль на занятия, соответствующие лекциям учебного курса, а в качестве единицы текста выбирать одну web-страницу занятия.

Web-страница должна включать в себя все, что относится к разделу занятия: определения, теоремы, замечания и демонстрационные задачи. Она должна уместиться на экране компьютера или мобильного устройства и читаться без дополнительной прокрутки. Переход от одного занятия к другому (от одной web-страницы к другой) должен осуществляться с помощью хорошо разработанной системы связи – интерфейсом.

При создании приложений для электронных устройств с широким экраном следует также учитывать, что применяемый в электронных продуктах язык гипертекстовой разметки – HTML плохо выглядит при размещении его «во весь экран», который в электронных устройствах «более широкий, чем длинный». В таких приложениях используют обычно двух полосное или трех полосное размещение, при котором текст располагается в правой или в центральной части, а левая часть, или левая и правая части (при трех полосном размещении) используются для элементов интерфейса: гиперссылок, кнопок, дополнительных меню, и.т.д.

1. Кратные интегралы	
Содержание	Занятие 1. Двойной интеграл
<p>Занятие 1. Двойной интеграл</p> <p>1.1. Области. Интеграл по области</p> <p>1.2. Определение, механический и геометрический смысл двойного интеграла</p> <p>1.3. Свойства двойного интеграла</p> <p>1.4. Двойной интеграл в декартовых координатах</p> <p>1.5. Повторный интеграл и его вычисление</p> <p>Список занятий по курсу "Кратные интегралы"</p>	<p>1.4. Двойной интеграл в декартовых координатах</p> <p><b>Теорема 1</b></p> <p>Если область <math>D</math>, на которой определен двойной интеграл <math>\iint_D f(x, y) dS</math>, задана неравенствами <math>\begin{cases} a \leq x \leq b \\ g_1(x) \leq y \leq g_2(x) \end{cases}</math>, то двойной интеграл по этой области можно представить в виде <i>повторного интеграла</i>:</p> $\iint_D f(x, y) dS = \int_a^b dx \int_{g_1(x)}^{g_2(x)} f(x, y) dy.$ <p><b>Доказательство (+)</b></p> <p><b>Теорема 2</b></p> <p>Если область <math>D</math>, на которой определен двойной интеграл <math>\iint_D f(x, y) dS</math>, задана неравенствами <math>\begin{cases} a \leq y \leq b \\ g_1(y) \leq x \leq g_2(y) \end{cases}</math>, то двойной интеграл по этой области можно представить в виде <i>повторного интеграла</i>:</p> $\iint_D f(x, y) dS = \int_a^b dy \int_{g_1(y)}^{g_2(y)} f(x, y) dx.$

Рис. 1. Окно просмотра электронного учебника

Одна web-страница будет занимать один экран, если в тексте выделено его ядро – основная информация: определения, теоремы, и.т.д., которая размещена на экране. Дополнительная информация: доказательство теорем, решение задач, и.т.д., должна открываться (или закрываться) по мере надобности с помощью обработчиков событий (рис. 1).

Фрагмент электронного учебника, разработанного на кафедре математики СПбГМТУ и размещенного на рис. 1, демонстрирует:

- использование выделения цветом отдельных частей текста, что способствует разделению его на составляющие – главные и дополнительные;
- размещение в левой части экрана меню занятия и кнопки перехода к списку занятий (а из него к списку модулей и на главную страницу), что обеспечивает свободную и понятную навигацию по всему учебнику;
- набор кнопок, которые открывают дополнительную информацию.

2.2. Мобильная версия

Содержание (контент) учебного материала для мобильных устройств в силу малости экрана разбивается на еще более малые фрагменты, а навигация по учебнику осуществляется через кнопки и гиперссылки. «Дружественный интерфейс» в подобных приложениях будет обеспечен, если все кнопки и ссылки снабжены названиями, по которым пользователь сможет легко и быстро ориентироваться в структуре учебника и перейти к нужному разделу.

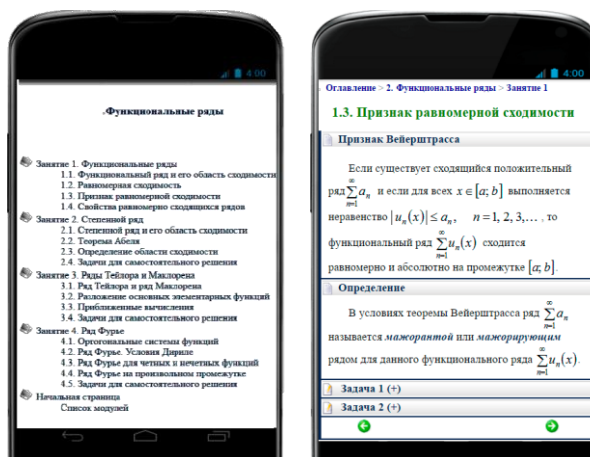


Рис.2. Окно просмотра мобильной версии приложения

У пользователя не должно быть проблем с восприятием информации с экрана мобильного приложения, что требует оптимального размера шрифта.

На рис. 2 размещены два окна просмотра мобильной версии учебника, где продемонстрированы двухуровневое меню одного модуля и одна web – страница. Элемент интерфейса, размещенный в верхней правой части экрана, выполнен в виде гиперссылок, по которым можно перейти к главному меню учебника, к меню модуля или к дополнительному меню изучаемого занятия. Переход от одной web – страницы к другой осуществляется кнопками вперед – назад, размещенными в нижней части экрана.

3. Приложения для проведения сеансов тестирования

Важнейшим компонентом электронного и мобильного обучения является система тестирования, дающая возможность преподавателю оперативно проводить проверку усвоения учебного материала обучающимися.

Система тестирования может быть реализована на основе виртуальной системы Sakai [5], которая использовалась в учебном процессе на

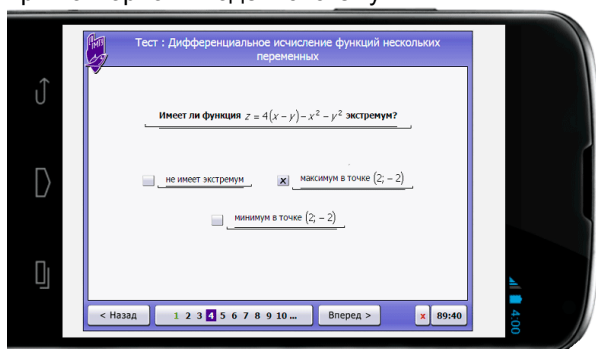
кафедре математики СПбГМТУ. Однако использование оболочки Sakai на мобильных устройствах ограничено их техническими возможностями.

Приложения для тестирования с применением мобильных устройств требует разработки в предназначенных для них операционных системах iOS, Android, Blackberry и Windows Phone.

Приложения для мобильных устройств можно выполнять и на платформах HTML, как это сделано в разработанной на кафедре математики программе тестирования, интерфейс которой представляет собой гипертекст, содержащий текстовые и графические элементы формата HTML. Логическая часть представляет собой код, написанный на языке JavaScript и выполняемый в соответствующем интерпретаторе, а обмен компонентами осуществляется с помощью запросов, передающихся по протоколу HTTP.

Данное приложение доступно пользователям через Интернет на мобильных устройствах, так как все его компоненты независимы от операционной системы, файлы имеют компактные размеры, а текст вопросов «вписывается» и «читаем» на экране мобильного устройства.

Окно приложения, открытое на смартфоне, показано на рис. 3. В программе предусмотрена свободная навигация, а порядок задач меняется при повторном входе в систему.



### Заключение

Использование электронных и мобильных устройств в образовании не должно сводиться к обмену информацией между обучающимися и преподавателями. Грамотно разработанные и удобные в использовании электронные ресурсы: электронные книги, учебники, мобильные приложения, и т.д. являются платформой для развития виртуальной образовательной среды, которая способствует систематизации знаний, выявлению в изучаемом предмете главного – ядра изучаемого материала.

Поскольку количество подключенных мобильных устройств в настоящее время превосходит количество жителей планеты, то адаптация интерфейса и визуализации on line – версий учебных электронных материалов под мобильную платформу особенно актуальна.

В последние годы по этой тематике появилось достаточно много литературы. Работа [6] Вейл Эстеля и его соавторов посвящена созданию

Рис. 3. Сеанс тестирования на смартфоне

После прохождения теста по выбранной теме оглашаются результаты. В результат включено:

- количество верно решенных задач;
- рейтинг – количество верно решенных задач в отношении к общему числу задач теста с учетом уровня их сложности;
- количество верно решенных задач в процентах и итоговая оценка по этому результату;
- время, затраченное на решение теста.

Актуальностью приложения является:

- сохранение результатов сеанса тестирования в «Дневнике пользователя» (рис. 4), который преподаватель может просмотреть после окончания занятия;
- возможность оперативно подготовить сеанс тестирования с помощью облачных сервисов без загрузки материалов через провайдеров на сайт университета;
- предусмотрена возможность повторного прохождения теста, что отражается в «Дневнике пользователя».

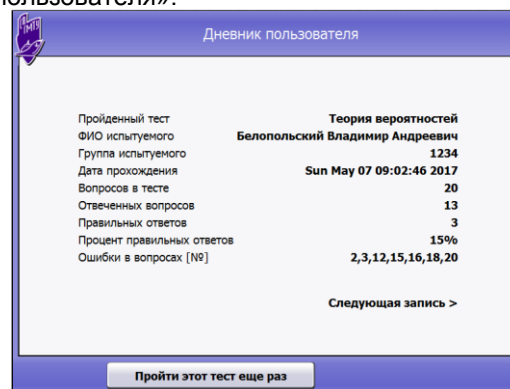


Рис. 4. Дневник пользователя

web – приложений для мобильных устройств на основе HTML5 и CSS3, а автор знаменитых бестселлеров Якоб Нильсен и его соавтор Ралука Будию в работе [7] делятся ценными соображениями о разработке мобильной стратегии дизайна и подготовки текста для миниатюрных экранов.

Приложения для электронного обучения, продемонстрированные в статье, разработаны в рамках проекта 1.1.1 «Разработка инновационных образовательных программ в сфере кораблестроения и океанотехники», финансируемого Программой стратегического развития СПбГМТУ на 2012 – 2016 годы.

Авторы выражают глубокую признательность руководству Санкт-Петербургского государственного морского технического университета за поддержку кафедры математики в работе по использованию в учебном процессе современных информационных технологий, а



также всем преподавателям кафедры, активно включившихся в эту работу

#### Литература

11. Nielsen Jacob. Usability Engineering. Изд.: Morgan Kaufmann: [англ.], 1993, 2010, 362 с.
12. Григорьев–Голубев В.В., Васильева Н.В., и др. Элементы дистанционного обучения математическим дисциплинам в системе высшего образования для кораблестроительных специальностей и направлений. Журнал «Морские интеллектуальные технологии», 2014, 136 – 141 с.
13. Григорьев–Голубев В.В., Васильева Н.В., и др. Интерактивный учебный комплекс по математике. Хроники объединенного фонда электронных ресурсов. «Наука и образование». 2013, № 3 (46). с. 1.
14. UNESCO Policy Guidelines for Mobile Learning. Организация Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры (ЮНЕСКО). <http://www.unesco.org/education/mlearning-resource>. (Дата захода 29.04.2017)
15. Григорьев–Голубев В.В., Васильева Н.В. и др. Комплекс программных средств и информационных материалов для дистанционного обучения на основе модульного подхода на платформе Sakai. Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование», 2015; 12(79): 35 – 36 с.
16. Вейл Эстель и др. HTML5: разработка приложений для мобильных устройств: [пер. с англ.], СПб.: Питер, 2015, 828 с.
17. Нильсен Якоб, Ралука Будию М. Mobile Usability. Как создавать идеально удобные приложения для мобильных устройств: [пер. с англ.]. Изд.: Эксмо, 2013, 256 с.

#### References

1. Nielsen Jacob. Usability Engineering. Publ.: Morgan Kaufmann, 1993, 2010, 362.
2. Grigorev-Golubev V.V., Vasilieva N.V., i dr. Elementy distancionnogo obucheniya matematicheskimi distsiplinam v sisteme vysshego obrazovaniya dlya korablestroitelnykh spetsialynostei i napravlenii. Zhurnal *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2014, 136 – 141 s.
3. Grigorev-Golubev V.V., Vasilieva N.V., i dr. Interaktivnyi uchebnyi complex po matematike. Khroniki ob'edinennogo fonda elecronnykh resursov *Nauka i obrazovanie*. 2013, № 3 (46). s. 1.
4. UNESCO Policy Guidelines for Mobile Learning. Organizatsiya Ob'edinennykh Natsii po voprosam obrazovaniya, nauki i kultury (YUNESKO). <http://www.unesco.org/education/mlearning-resource>. (Data zakhoda 29.04.2017)
5. Grigorev-Golubev V.V., Vasilieva N.V., i dr. Komplex programnykh sredstv i informatsionnykh materialov dlya distancionnogo obucheniya na osnove modulnogo podkhoda na platforme Sakai. Khroniki ob'edinennogo fonda elecronnykh resursov *Nauka i obrazovanie*. 2015; 12 (79): 35 – 36 s.
6. Estelle, Weyl: Mobile HTML5. Using the Latest Today. Publ.: O'Reilly Media, 2013, 480 p.
7. Nielsen, Jacob, Raluca, Budiu. Mobile Usability. Publ.: New Riders, 2012, 256 p.

УДК 539.41; 620.17; 691.175.3

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ФЕНОМЕНА ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ОБРАЗЦОВ ПРИ ИЗГИБЕ ПО СРАВНЕНИЮ С РАСТЯЖЕНИЕМ

**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., 4  
e-mail: 605fractal@mail.ru

**Меньшикова Мария Валерьевна**

магистрант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
Санкт-Петербург, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4  
e-mail: hiro398@mail.ru

### Аннотация

В статье рассматривается градиентный эффект, заключающийся в увеличении прочности образцов из хрупкого материала при изгибе по сравнению с прочностью таких же образцов при растяжении. Для этого проводится сравнение механических характеристик прочность прямоугольного образца при чистом изгибе. Это увеличение прочности означает, что для некоторых материалов разрушающие напряжения при растяжении образцов могут быть меньше разрушающих напряжений при их изгибе на 30-70%. Такой эффект экспериментально установлен, например, для сферопластиков, которые широко применяются в морской, авиационной технике, в ракетостроении и строительстве.

В статье феномен различных разрушающих напряжений при растяжении и изгибе объясняется с помощью структурно-статистической интерпретации процесса разрушения. Материал описывается структурной моделью Даниэлса (соответствующей хрупкому разрушению). Предел прочности элементов структурной модели считается случайной величиной с заданной функцией распределения.

В статье также предложены формулы для учета при расчете изгибных напряжений неодинаковости модулей упругости и характеристик прочности при растяжении и сжатии.

**Ключевые слова:** структурная модель, критерий прочности, градиентный эффект, сферопластики.

## USE OF STRUCTURAL MODELS FOR INTERPRETATION OF THE INCREASE PHENOMENON IN DURABILITY OF SAMPLES AT THE BEND IN COMPARISON WITH STRETCHING

**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  
e-mail: 605fractal@mail.ru

**Menshikova Maria Valerjevna**

undergraduate,  
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

## Abstract

In article the gradient effect consisting in increase of fragile material samples durability at a bend in comparison with durability of the same samples at stretching is considered. This increase in durability means that for some materials breaking points at samples stretching can be less breaking points at their bend for 30-70%. Such effect is experimentally established, for example, for sferoplastik which are widely applied in the marine, aircraft equipment, in rocket production and construction.

In article the phenomenon of various breaking stresses at stretching and a bend has a talk with the help of structural and statistical interpretation of destruction process. Material is described by structural model of Daniels (corresponding to brittle failure). Ultimate strength of structural model elements is considered a random value with the given function of distribution.

In article formulas for the account when calculating flexural tension of elastic modules dissimilarity and characteristics of tensile strength and compression are also offered.

**Keywords:** structural model, strength criterion, gradient effect, sferoplastics

### Введение

Во многих случаях объяснение ряда феноменов в механике разрушения может быть достигнуто анализом структурных моделей [1,2]. Применение структурных моделей может быть полезно и при обосновании градиентной теории прочности.

В статье рассматривается градиентный эффект, заключающийся в увеличении прочности образцов из хрупкого материала при изгибе по сравнению с прочностью таких же образцов при растяжении. Это увеличение прочности означает, что для ряда композитных материалов разрушающие напряжения при растяжении образцов могут быть меньше разрушающих напряжений при их изгибе на 30-70%. Такой эффект экспериментально установлен, например, для сферопластиков, которые широко применяются в морской, авиационной технике, в ракетостроении и строительстве.

Данные композитные материалы имеют срок службы до 50 лет, в том числе и в морской и пресной воде. Некоторые примеры применения сферопластиков: элементы дополнительной плавучести различных глубоководных технических средств, заполнение межбортного пространства катеров и лодок для обеспечения непотопляемости.

В статье феномен различных разрушающих напряжений при растяжении и изгибе объясняется с помощью структурно-статистической интерпретации процесса разрушения. Материал описывается структурной моделью Даниэлса (соответствующей хрупкому разрушению). Предел прочности элементов структурной модели считается случайной величиной с заданной функцией распределения. Такие структурные модели были рассмотрены в целом ряде работ [1-14]. В [1] была предложена формула для определения текущего усилия  $S$  в растягиваемом образце. Ниже предлагается формула, которая позволяет вычислить текущий изгибающий момент  $M$ . Вышеуказанные формулы позволяют установить разрушающую образец силу и разрушающий мо-

мент. Каждому из этих силовых факторов соответствуют разрушающие напряжения (одинаковые по всему сечению при растяжении и в крайних волокнах при изгибе). Сравнение этих напряжений позволяет объяснить градиентный феномен увеличения прочности при изгибе.

В статье также предложены формулы для учета при расчете изгибных напряжений неодинаковости модулей упругости и характеристик прочности при растяжении и сжатии.

Проанализированы и сопоставлены с предлагаемыми расчетами результаты экспериментов на образцах из сферопластика [15].

### 1.1. Прочность прямоугольного образца при одноосном растяжении

Структурная модель, описывающая хрупкое разрушение стержня при растяжении рассмотрена в [1]. Следуя [1], будем считать, что прочность растягиваемого образца определяется прочностью хрупко разрушающихся структурных элементов параллельно работающих в сечении стержня (модель Дэниелса). Структурный элемент работает линейно упруго, пока усилие  $s$  в нем не достигнет предельного для этого элемента значения  $r$ . Это значение представляет собой случайную величину с заданной функцией распределения  $F(r)$ . Сила, действующая в сечении стержня

$$S = N \cdot s [1 - F(s)], \quad (1)$$

где  $N$  – число структурных элементов в сечении,  $s$  – текущее усилие в структурном элементе.

Если  $N$  очень велико, то, как показано в [1],  $S$  можно считать математическим ожиданием случайной величины  $S$ . Напряжения в сечении:

$$\sigma_t = \frac{S}{H \cdot b}, \quad (2)$$

где  $H$  – высота сечения,  $b$  – ширина сечения.

Далее  $F(r)$  определяется так, как предлагает В.В.Болотин [1]:

$$F(r) = \begin{cases} 0, & r < r_c \\ \left(\frac{r-r_0}{r_c-r_0}\right)^\alpha, & r_0 \leq r \leq r_c \\ 1, & r > r_c \end{cases} \quad (3)$$

где  $r_c, r_0$  – нижний и верхний пределы прочности структурных элементов (имеющие размерность силы).

Перейдем к безразмерным параметрам:

$$k = \frac{r_0}{r_c}; \gamma = \frac{s}{r_c} < 1. \quad (4)$$

Тогда разрушающее напряжение при растяжении:

$$\sigma_t^* = \max_{\gamma} \frac{\gamma r_c N}{H \cdot b} [1 - F(\gamma)], \quad (5)$$

где  $F(r) = \begin{cases} 0, & \gamma < k \\ \left(\frac{\gamma-k}{1-k}\right)^\alpha, & k \leq \gamma \leq 1 \end{cases} \quad (6)$

**1.2. Прочность прямоугольного образца при чистом изгибе**

Пусть  $s_0$  – усилие в структурных элементах, находящихся в крайних волокнах прямоугольного сечения. Тогда усилия в структурных элементах, находящихся на расстоянии  $x$  от центра, равны

$$r = \frac{x}{h} s_0, \quad \text{где } h = \frac{H}{2}. \quad (7)$$

Вычислим элементарные моменты  $dM$ , создаваемые «полоской»  $dx$ . Предположим, что число структурных элементов в этой «полоске» очень велико, и эти элементы являются репрезентативной выборкой из генеральной совокупности всех структурных элементов сечения. Тогда

$$dM = \frac{2s_0 N}{H} x^2 \left(1 - F\left(s_0 \frac{x}{h}\right)\right) dx. \quad (8)$$

Из (8) получаем

$$M = \frac{4s_0 N}{H^2} \int_0^{\frac{H}{2}} x^2 \left(1 - F\left(s_0 \frac{x}{h}\right)\right) dx. \quad (9)$$

С увеличением  $s_0$  момент (9) будет увеличиваться, затем уменьшаться. Разрушение наступит при максимальном моменте.

Перейдем в (9) к безразмерным параметрам

$$l = \frac{x}{h} \leq 1; \quad \beta = \frac{s_0}{r_c}. \quad (10)$$

С учетом (10) максимальный момент

$$M_* = \max_{\beta} \frac{4\beta r_c N}{H^2} h^3 \int_0^1 l^2 (1 - F(l)) dl, \quad (11)$$

где  $F(r) = \begin{cases} 0, & \gamma < k \\ \left(\frac{\gamma-k}{1-k}\right)^\alpha, & k \leq \gamma \leq 1 \end{cases} \quad (12)$

Разрушающие напряжения на крайних волокнах при изгибе формально определяются так

$$\sigma_b^* = \frac{M_*}{W}, \quad \text{где } W = \frac{H^2 b}{6}.$$

**2.1. Градиентный эффект**

Градиентный эффект выявляется следующим соотношением

$$K = \frac{\sigma_b^*}{\sigma_t^*} = \frac{\max_{\beta} \frac{3\beta r_c N}{Hb} \left( \frac{1}{3} - \int_{\frac{k}{\beta}}^1 l^2 F(l) dl \right)}{\max_{\gamma} \frac{\gamma r_c N}{Hb} [1 - F(\gamma)]}. \quad (13)$$

По формуле (13) коэффициент  $K$ , характеризующий градиентный эффект, можно определить вычислением числителя и знаменателя формулы, как функций  $\beta, \gamma$ .

Зависимость  $K$  от  $\alpha$  представлена на рис.1.

Имеются результаты механических испытания образцов эпоксидного сферопластика, в ходе которых были определены характеристики прочности при нормальной температуре [15]:

- предел прочности при изгибе –  $\sigma_{изг} = 55.6 \text{ МПа}$ ,
- предел прочности при растяжении –  $\sigma_{раст} = 44.5 \text{ МПа}$ ,
- предел прочности при сжатии –  $\sigma_{сж} = 62.1 \text{ МПа}$ .

$$\frac{\sigma_{изг}}{\sigma_{раст}} = 1.25.$$

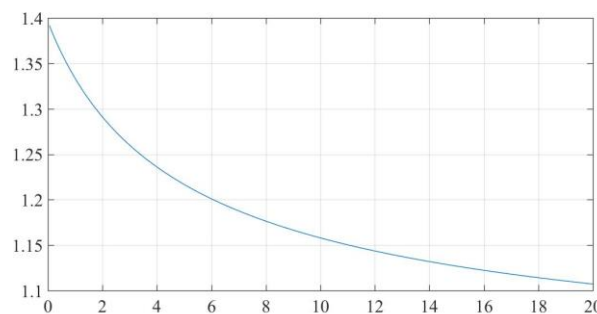


Рис. 1. Зависимость градиентного коэффициента  $K$  от параметра  $\alpha$  при  $k=0$

Этот эксперимент и рис.1 показывают, что структурные модели могут объяснить градиентный эффект. Однако, для адекватного описания свойств композитных материалов с помощью таких моделей необходим учет разномодульно-

сти материала и его разнопрочности при растяжении и сжатии.

**2.2. Учет разномодульности материала**

Пусть модуль упругости при сжатии больше модуля упругости при растяжении:  $E_2 > E_1$ . Введем обозначение

$$\chi = \frac{E_2}{E_1}. \tag{14}$$

Относительные деформации определяются по формуле

$$\varepsilon = \frac{x}{\rho} = \chi s, \tag{15}$$

где  $\rho$  – радиус кривизны,  $s$  – кривизна изгибаемого образца (при чистом изгибе она одинакова для всех сечений).

Нейтральная ось сечения будет смещена по отношению к середине. Поэтому усилия в структурных элементах, находящихся в крайних волокнах прямоугольного сечения различны:

$$s_{01} = E_1 \varepsilon_1 = E_1 h_1 s, \quad s_{02} = E_2 \varepsilon_2 = E_2 h_2 s. \tag{16}$$

Сжимающие и растягивающие силы соответственно равны

$$R_1 = \frac{N}{H} \frac{s_{01}}{h_1} \int_0^{h_1} x(1 - F(s_1)) dx, \tag{17}$$

$$R_2 = \frac{N}{H} \frac{s_{02}}{h_2} \int_0^{h_2} x(1 - F(s_2)) dx. \tag{18}$$

При чистом изгибе продольные силы в сечении отсутствуют, следовательно

$$R_1 = R_2. \tag{19}$$

Введем обозначения:

$$\beta_1 = \frac{s_{01}}{r_c}; \quad \beta_2 = \frac{s_{02}}{r_c}; \quad k = \frac{r_0}{r_c}; \quad l_1 = \frac{x}{h_1};$$

$$l_2 = \frac{x}{h_2}; \quad t = \frac{h_2}{h_1}. \tag{20}$$

После ряда преобразований с использованием (16) – (20) уравнение (19) запишется в виде – (21):

$$\frac{1}{\chi t^2} \int_0^1 l \left[ 1 - \left( \frac{\beta l - k}{1 - k} \right)^\alpha \right] dl - \int_0^1 l \left[ 1 - \left( \frac{\beta l - k}{1 - k} \right)^\alpha \right] dl = 0$$

Из уравнения находится параметр  $t$ , разграничивающий сжатую и растянутую зону.

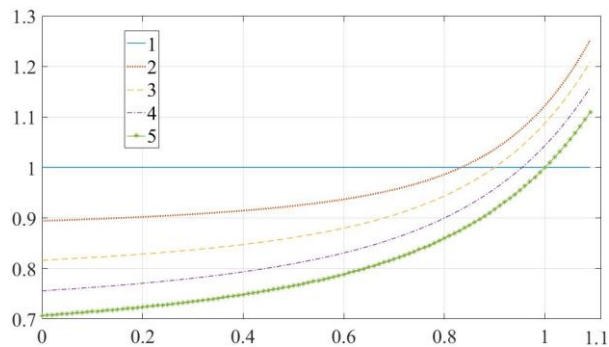


Рис 2. Зависимость величины  $t$  от  $\beta$  при  $k=0, \alpha=1$

Изначально  $t = h_1/h_2 < 1$ . Затем, при увеличении  $\beta$ , а следовательно и усилий в структурных элементах, величина  $t$  постепенно увеличивается и при определенном значении  $\beta$  принимает значения большие единицы, т.е. нейтральная ось смещается в сторону меньшего модуля. Такое «парадоксальное» явление можно объяснить тем, что в более нагруженной зоне происходит процесс более интенсивного разрушения.

Разрушающий момент в рассматриваемом случае – (22):

$$M_* = M_1 + M_2 = \max_{\beta} \frac{N}{H} r_c \beta h_2^2 \times$$

$$\times \left[ \frac{1}{\chi t^3} \int_0^1 l^2 \left[ 1 - \left( \frac{\beta l - k}{1 - k} \right)^\alpha \right] dl + \int_0^1 l \left[ 1 - \left( \frac{\beta l - k}{1 - k} \right)^\alpha \right] dl \right].$$

Разрушающие напряжения в крайних волокнах  $\sigma_b^* = \frac{M_*}{W_x}$ , где момент сопротивления сечения с учетом  $H = h_2 \left( 1 + \frac{1}{t} \right)$  определяется следующим выражением

$$W_x = \frac{H^3}{12} + \frac{H \left( h_2 - \frac{H}{2} \right)^2}{h_1}.$$

Тогда – (23):

$$\sigma_b^* = \max_{\beta} \frac{N}{H} r_c \beta \frac{12}{t+1} \times$$

$$\times \frac{\left[ \frac{1}{\chi t^3} \int_0^1 l^2 \left[ 1 - \left( \frac{\beta l - k}{1 - k} \right)^\alpha \right] dl + \int_0^1 l \left[ 1 - \left( \frac{\beta l - k}{1 - k} \right)^\alpha \right] dl \right]}{\left( 1 + \frac{1}{t} \right)^2 + 3 \left( 1 - \frac{1}{t} \right)^2}.$$

Для оценки величины эффекта разномодульности материала в случае изгиба балки найдем отношение разрушающих напряжений, рассчитанных при следующих значениях исходных параметров:  $k = 0$ ,  $\alpha = 1$  при  $\chi = 1$  ( $E_2 = E_1$ ) и при  $\chi = 1.5$  ( $E_2 \neq E_1$ ).

$$\frac{\sigma_b^*(\chi = 1)}{\sigma_b^*(\chi = 1.1667)} = \frac{0.3333}{0.3366} = 0.9901.$$

Как видно из приведенного примера этот эффект невелик.

В таблице 1 для различных  $\chi$  приведены значения параметра  $\beta$ , при которых будут достигнуты разрушающие напряжения, и соответствующие им отношения  $\delta = \sigma_b^* H / r_c N$ . При увеличении  $\chi$  величина разрушающих напряжений сначала увеличивается, но потом вновь начинает уменьшаться.

Таблица 1 – Значения параметра  $\beta$  и отношения  $\delta$ , соответствующие моменту разрушения, при различных  $\chi$ .

$\chi$	$\delta$	$\beta$
1.0	0.3333	0.66
1.25	0.3375	0.69
1.5	0.3378	0.71
1.75	0.3358	0.73
2.0	0.3324	0.74

### 2.3. Прочность при изгибе с учетом разных параметров функции распределения для сжатой и растянутой части сечения

Пусть прочность растянутых и сжатых волокон описывается функциями распределения  $F(s_1)$  и  $F(s_2)$  соответственно, имеющими раз-

#### Заключение

1. С использованием структурно-статистической интерпретации процесса разрушения получена формула для определения величины градиентного эффекта при изгибе хрупкого стержня.

личные параметры распределения, т.е. в общем случае  $r_{c1} \neq r_{c2}$ ;  $r_{01} \neq r_{02}$ ;  $\alpha_1 \neq \alpha_2$ .

Использование функции распределения с разными параметрами также приведет к смещению нейтральной оси сечения. Таким образом, алгоритм расчета аналогичен предыдущему случаю.

Рассмотрим частный случай при  $k_1 = k_2 = 0$ ;

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 1. \text{ Обозначим } \eta = \frac{r_{c2}}{r_{c1}}.$$

Таблица 2 – Значения параметра  $\beta$  и отношения  $\delta$ , соответствующие моменту разрушения, для различных  $\eta$  при  $k_1 = k_2 = 0$ ;  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ .

$\eta$	$\delta$	$\beta$
1.0	0.3333	0.66
1.25	0.3790	0.77
1.5	0.3972	0.77
1.75	0.4067	0.77
2.0	0.4126	0.77

Вновь обратимся к результатам испытания эпоксидного сферопластика [15], в соответствии с которыми определим  $\eta = 1.4$ .

Для оценки величины исследуемого эффекта в случае изгиба балки найдем отношение разрушающих напряжений, рассчитанных при  $\eta = 1$  ( $F(s_1) = F(s_2)$ ) и при  $\eta = 1.4$  ( $F(s_1) \neq F(s_2)$ ).

$$\frac{\sigma_b^*(\eta = 1)}{\sigma_b^*(\eta = 1.4)} = \frac{0.3333}{0.3915} = 0.8513.$$

Градиентный коэффициент в этом случае равен

$$K = \frac{\sigma_b^*}{\sigma_t^*} = \frac{0.3915}{0.25} = 1.566.$$

2. Произведена оценка влияния на градиентный эффект различных свойств материала при растяжении и сжатии.

3. Численные результаты, полученные в ходе исследования, согласуются с имеющимися экспериментальными данными для эпоксидного сферопластика.

#### Литература

1. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
2. Гохфельд Д.А., Садаков О.С. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях. – М.: Машиностроение, 1984.
3. Александров А. П., Журков Н. С. Явление хрупкого разрыва. – М.: ГТТИИ, 1933. – 51 с.
4. Weibull W.A. A Statistical Theory of the Strength of Materials // Proc. Roy. Swed. Inst. Eng. Res. – 1939. – N 151. – P. 5 – 45.
5. Конторова Т.А., Тимошенко О.А. Обобщение статистической теории прочности на случай неоднородного напряженного состояния // Журн. техн. физики. – 1949. – 19, № 3. – С. 119 – 121.
6. Конторова Т.А., Френкель Я.И. Статистическая теория хрупкой прочности реальных кристаллов // Журнал технической физики. – 1941. – Т. XI. – Вып. 3. – С. 173 – 183.
7. Болотин В.В. Стохастические модели разрушения в однонаправленных волокнистых композитах // Механика композитных материалов. – 1981. – № 3 – С. 404 – 420.
8. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.

9. Седракян Л.Г. К статистической теории прочности. – Ереван: Изд-во АРМ. Ин-та стройматериалов и сооружений, 1958. – 104 с.
10. Weibull W. The phenomenon of rupture in solid // Proc. Royal Swed. Inst. Eng. Res. – 1939. – 153. – P. 1 – 55.
11. Weibull W. A statistical theory of strength of materials // Ibid. – 1939. – 151. – P. 5 – 45.
12. Flaceliere L. and Morel F. Probabilistic approach in high-cycle multiaxial fatigue: volume and surface effects // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. –2004. – 27, No. 12. – P. 1123 – 1136.
13. Харлаб В.Д. Обобщение weibullовской статистической теории хрупкого разрушения // Механика стержневых систем и сплошных сред: Межвуз. темат. сб. тр. / ЛИСИ. – Л., 1978. – Вып. 11. – С. 150 – 152.
14. Рутман Ю.Л. Использование структурных моделей для интерпретации экспериментальных результатов // Труды 4-й международной конференции "Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения". – СПб, Государственный технический университет, 2001. – С. 263-264.
15. Патент РФ № 2587454 от 20.05.2015 года, З.№ 2013149318 от 07.11.2013 года. Патентообладатель: Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей" (ФГУП "ЦНИИ КМ "Прометей") (RU), Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство образования и науки Российской Федерации (Минобрнауки РФ) (RU) – C08J 5/04.

### References

1. Bolotin V. V. Prognozirovanie resursa mashin i konstrukcij. M.: Mashinostroenie, 1984. – 312 p.
2. Gohfel'd D.A., Sadakov O.S. Plastichnost' i polzuchest' jelementov konstrukcij pri povtornyh nagruzhenijah. - M.: Mashinostroenie, 1984.
3. Aleksandrov A. P., Zhurkov N. S. Javlenie hрупкого razryva. – M.: GTTII, 1933. – 51 p.
4. Weibull W.A. A Statistical Theory of the Strength of Materials // Proc. Roy. Swed. Inst. Eng. Res. – 1939. – N 151. – P. 5 – 45.
5. Kontorova T.A., Timoshenko O.A. Obobshhenie statisticheskoy teorii prochnosti na sluchaj neodnorodnogo naprjazhennogo sostojanija // Zhurn. tehn. fiziki. – 1949. – 19, № 3. – P. 119 – 121.
6. Kontorova T.A., Frenkel' Ja.I. Statisticheskaja teorija hрупкой prochnosti real'nyh kristallov // Zhurnal tehnicheckoy fiziki. – 1941. – T. XI. – Vyp. 3. – P. 173 – 183.
7. Bolotin V.V. Stohasticheskie modeli razrushenija v odnonapravlennyh voloknistyh kompozitah // Mehanika kompozitnyh materialov. – 1981. – № 3 – P. 404 – 420.
8. Kogaev V.P. Raschety na prochnost' pri naprjazhenijah, peremennyh vo vremeni. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 232 p.
9. Sedrakjan L.G. K statisticheskoy teorii prochnosti. – Erevan: Izd-vo ARM. In-ta strojmaterialov i sooruzhenij, 1958. – 104 p.
10. Weibull W. The phenomenon of rupture in solid // Proc. Royal Swed. Inst. Eng. Res. – 1939. – 153. – P. 1 – 55.
11. Weibull W. A statistical theory of strength of materials // Ibid. – 1939. – 151. – P. 5 – 45.
12. Flaceliere L. and Morel F. Probabilistic approach in high-cycle multiaxial fatigue: volume and surface effects // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. –2004. – 27, No. 12. – P. 1123 – 1136.
13. Harlab V.D. Obobshhenie weibullovskej statisticheskoy teorii hрупкого razrushenija // Mehanika sterzhnevnyh sistem i sploshnyh sred: Mezhvuz. temat. sb. tr. / LISI. – L., 1978. – Vyp. 11. – P. 150 – 152.
14. Rutman Ju.L. Ispol'zovanie strukturyh modelej dlja interpretacii jeksperimental'nyh rezul'tatov // Trudy 4-j mezhdunarodnoj konferencii "Nauchno-tehnicheckie problemy prognozirovanija nadezhnosti i dolgovechnosti konstrukcij i metody ih reshenija". – SPb, Gosudarstvennyj tehnicheckij universitet, 2001. – P. 263-264.
15. Patent RF № 2587454 ot 20.05.2015 goda, Z.№ 2013149318 ot 07.11.2013 goda. Patentobladatel': Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatje "Central'nyj nauchno-issledovatel'skij institut konstrukcionnyh materialov "Prometej" (FGUP "CNII KM "Prometej") (RU), Rossijskaja Federacija, ot imeni kotoroj vystupaet Ministerstvo obrazovanija i nauki Rossijskoj Federacii (Minobrnauki RF) (RU) – C08J 5/04.

УДК 629.12.001.2

## МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА МЕТАЛЛ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ

### **Воропаев Александр Олегович**

студент кафедры сварки судовых конструкций  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10

### **Воропаева Мария Валентиновна**

студент кафедры проектирования судов  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10

### **Куракин Артур Ильич**

ассистент кафедры сварки судовых конструкций  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10

### **Ли Дмитрий Соканович**

аспирант кафедры сварки судовых конструкций  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10

### **Мурзин Виктор Васильевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры сварки судовых конструкций  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10  
тел.: (812) 454-09-39; e-mail: ksv@smtu.ru

### **Аннотация**

Сварка под водой осуществляется, как правило, с короткими замыканиями, которые следуют друг за другом с более-менее постоянным интервалом, достаточной частотой и длительностью. Целесообразно осуществлять внешнее электромагнитное воздействие (ВЭВ) в периоды отсутствия дуги, либо осуществлять на неё как можно менее интенсивное воздействие, синхронизируя импульсы ВЭВ с короткими замыканиями электродов.

Основной целью работы является создание устройства для изучения влияния синхронизации импульсов электромагнитного воздействия с импульсами силовой цепи сварочного контура и обеспечение принудительной синхронизации импульсов для снижения дестабилизирующего воздействия при сохранении интенсивности ВЭВ.

Для проведения исследования был спроектирован и изготовлен комплекс оборудования, включающий в себя: адаптивную систему управления, позволяющую оказывать электромагнитное воздействие синхронизировано с импульсами силовой цепи сварочного контура; электромагнит ввода поля, спроектированный под созданную систему управления; тесламетр.

**Ключевые слова:** подводная сварка, внешнее электромагнитное воздействие, синхронизация, дуговая сварка, ЭМ перемешивание, микропроцессорное управление.

## MICROPROCESSOR CONTROL OF THE ELECTROMAGNETIC INFLUENCE ON THE METAL OF THE WELD

**Kurakin Arthur I.**

assistant of department of welding of ships stractions  
Saint-Petersburg state marine technical university  
Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190008, Russian Federation

**Li Dmitry S.**

graduate student of department of welding of ships stractions  
Saint-Petersburg state marine technical university  
Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190008, Russian Federation

**Murzin Victor V.**

Ph. D., associate Professor department of welding of ships stractions  
Saint-Petersburg state marine technical university



Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190008, Russian Federation

**Voropaev Alexander O.**

student of department of welding of ships stractions  
Saint-Petersburg state marine technical university  
Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190008, Russian Federation

**Voropayeva Mariya V.**

student of department of ship design  
Saint-Petersburg state marine technical university  
Lotsmanskaya, 10, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
tel.: (812) 454-09-39; e-mail: ksv@smtu.ru

### Abstract

Underwater welding is usually performed with a short circuit, which follow each other with more or less regular intervals, sufficient frequency and duration. It is advisable to carry out electromagnetic interference during periods of absence of the arc, or carry it on the least intense effects, synchronizing pulses of the external electromagnetic interference (EEI) a short circuit electrode.

The main objective is to provide a device to study the influence of synchronization of electromagnetic pulse effects with the power circuit of the welding circuit and software forced synchronization pulses to reduce the destabilizing effects while maintaining the intensity of the EEI.

To conduct the study was designed and manufactured a set of equipment, including: an adaptive control system which allows to provide electromagnetic effects synchronized with pulses of the power circuit of the welding circuit; electromagnetic input fields designed for establish a management system; teslameter.

**Keywords:** underwater welding, external electromagnetic interference, synchronization, arc welding, EM stirring, microprocessor control.

В СПбГМТУ проводятся работы по созданию комплекса оборудования и технологии для механизированной подводной сварки мокрым способом для нужд флота, судостроительной и нефтегазодобывающей промышленности. В рамках этих работ производился поиск возможных методов решения проблем, связанных с использованием внешнего электромагнитного воздействия (ВЭВ) на металл сварочной ванны. Целью данной работы являлось, на основании ранее опубликованных данных [4] о процессе электромагнитного перемешивания металла сварного шва и выявленных научно-технических проблем, разработать методы с использованием микропроцессорного управления алгоритмами ВЭВ.

Обобщая литературные и экспериментальные данные можно сказать, что ВЭВ благоприятно сказывается на металлургических процессах и обеспечивает повышение механических свойств литого металла [1,2,3]. В числе факторов, влияющих на характеристики стали можно отметить более равномерное распределение легирующих компонентов в кристаллической структуре, измельчение зерен, обусловленное интенсивным движением расплавленного металла, препятствует росту дендритных кристаллов и создает дополнительные центры кристаллизации, и увеличение объемного взаимодействия расплавленного металла с жидким шлаком, что приводит к интенсификации процессов легирования и раскисления. Более равномерное распределение ликвирующих компонентов, образованных соединениями вредных примесей снижает концентра-

цию напряжений в металле и препятствует зарождению трещин. Также можно отметить повышение дегазации металла, обусловленное перемешиванием расплава и более интенсивным раскислением.

Несмотря на обозначенные преимущества, ВЭВ не находит широкого применения, ввиду сложности создания оборудования и дестабилизирующего воздействия магнитных полей на сварочную дугу. Положительный эффект может быть полностью нивелирован сложностью самого устройства ВЭВ и его использования, а неверно установленные параметры ВЭВ могут и вовсе приводить к получению неработоспособных соединений. Однако метод широко применяется в металлургии, например, в машинах непрерывного литья заготовок, и позволяет существенно снизить затраты при повышении объемов и качества выхода готовой продукции [5, 6]. Следовательно, основными задачами при внедрении ВЭВ в сварочное производство является максимальная автоматизация процесса и решение проблем связанных с воздействием магнитных полей на дугу.

Согласно источникам [5,6], в машинах непрерывного литья индукция достигает в пределах сотен мТл, при сварке приемлемые значения находятся в диапазоне 25-30 мТл [4]. При больших значениях ВЭВ на дугу оказывается сильное дестабилизирующее воздействие, приводящее к обрывам сварочной дуги.

Согласно [4] наиболее заметным электромагнитное воздействие становится при достижении больших величин индукции ЭМП, но это приводит

к частым обрывам дуги и срывам формирования сварочной ванны. Опыт применения высокобыстродействующей системы стабилизации и регулирования параметров сварочной дуги [7,8,9] позволяет предположить возможность стабилизировать дугу импульсным воздействием со скоростями реакции до 1500 кА/с при одновременной синхронизации импульсов тока с импульсами ЭМП.

Для повышения стабильности сварочного процесса предлагается оказывать электромагнитное воздействие в моменты короткого замыкания, когда дуга не горит. Первым решением было использовать индуктор, последовательно включённый в сварочную цепь. При горении дуги

оказывалось слабое электромагнитное воздействие на дугу, а во время короткого замыкания, когда ток возрастал – более интенсивное воздействие, пропорциональное росту тока.

На рис. 1 представлены осциллограммы тока индукции, тока сварки и напряжения дуги во время MAG сварки. На осциллограмме видно, что при оказании ВЭВ без синхронизации с импульсами КЗ происходит увеличение напряжения дуги, что свидетельствует об отклонении дуги при ВЭВ, то есть снижении стабильности горения, приводящей к обрыву дуги. Отмечено, что при использовании синхронизации ВЭВ путем последовательного включения в сварочную цепь стабильность горения заметно выше.

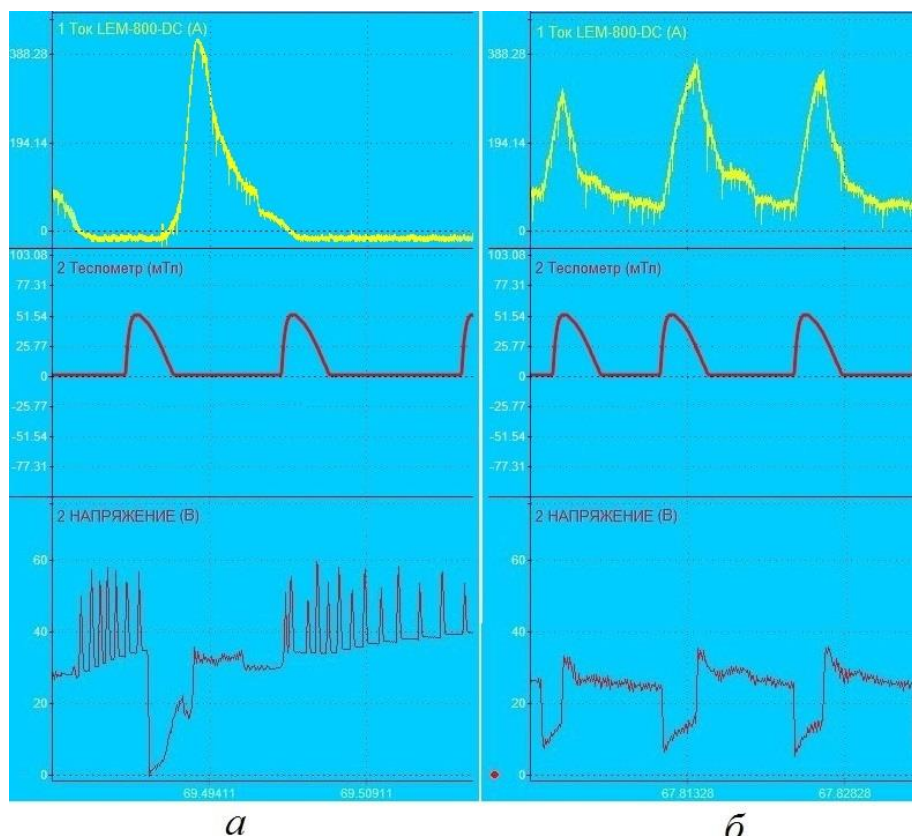


Рис.1. Влияние синхронизации импульсов ВЭВ на стабильность горения дуги при MAG сварке  
а – без синхронизации ВЭВ, б – с синхронизацией ВЭВ

Однако, при использовании последовательно включённого индуктора есть очевидный недостаток – невозможность изменять параметры воздействия во время процесса сварки. В связи с этим была разработана лабораторная установка, структурная схема которой представлена на рис.2. В каждом цикле своей работы система управления (СУ) выполняет измерение сварочного тока, сравнивая его с заданной величиной тока короткого замыкания. При превышении порогового значения тока короткого замыкания, СУ подаёт сигнал на источник питания и через электромагнит ввода поля (ЭМВП) пропускается ток с задан-

ными амплитудно-частотными параметрами.

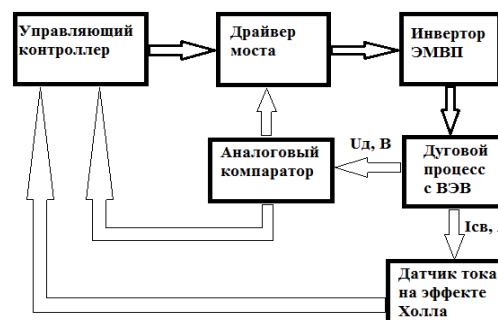


Рис.2. Структурная схема устройства электромагнитного воздействия

Произведён анализ осциллограмм сварки в активном газе. Средняя длительность КЗ составляет 5 мс. А время нарастания напряжения дуги до заданного значения порядка 40 мкс. После проведения анализа возможностей современных микропроцессорных контроллеров, установлено, что быстродействия цифровой обратной связи недостаточно для гарантированного исключения влияния задержек прохождения сигнала (которые могут достигать 500 мкс) на результаты эксперимента. С этой целью цифровая обратная связь дублируется аналоговой, с предустановленными

в опыте порогами срабатывания. Скорость переключения аналоговой системы порядка 50 нс.

#### Заключение

Использование более современных микропроцессоров с улучшенными динамическими характеристиками позволит повысить точность ВЭВ на металл сварочной ванны, расширяя возможности исследования воздействия электромагнитных полей на сварочные процессы.

Модуль ВЭВ наиболее целесообразно включать в комплекс оборудования, имеющего возможности взаимной интеграции на основе современных цифровых систем управления [7].

#### Литература

1. Влияние внешнего электромагнитного воздействия на содержание водорода при мокрой подводной сварке /С.Ю. Максимов, Р.Н.Рызов, Е.А.Прилипко, В.А.Кожухарь //Автоматическая сварка – 2003. №6 – с 55-56.
2. Совершенствование оборудования для подводной механизированной и автоматизированной сварки и резки порошковой проволокой / Б. Е. Патон, В. А. Лебедев, С. Ю. Максимов и др. // Сварка и Диагностика. 2011. № 5. С. 54—59.
3. Подводная сварка в переменном магнитном поле. Зайцева Н.В. Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, Киев. Международная конференция “Современные проблемы физики материалов”, Киев, 7-8 окт., 2008; Сборник тезисов. Киев: ИМФ “ПЭТ”, 2008, с. 253. Рус.
4. Оценка влияния электромагнитного воздействия на структуру металла шва, выполненного автоматической сваркой под водой /Воропаев А.О.,Карпов В.М., Ли Д.С., Самойленко Р.С.// Морские и интеллектуальные технологии 4(26) Т.1 2014, - с 80-84.
5. Системы электромагнитного перемешивания для промышленных машин непрерывного литья стали /Шифрин И. Н., Целиков А. А., Грачев В.Г. и др. // Тяжелое машиностроение (№5),2003, - с. 7-12.
6. Системы электромагнитного перемешивания жидкой стали на сортовых, блюмовых и слябовых МНЛЗ /В. Грачев, Л. Кузьмина, Ф. Солодовник, И. Шифрин, А. Целиков, А. Ротенберг // Национальная металлургия: Оборудование (технический альманах)(4), 2005, - с 48-52
7. Упрощенное программирование сварочных процессов на java-совместимом языке ввода команд XML/В.М. Карпов, А.В. Владимиров, В.В. Мурзин// Морские интеллектуальные технологии: Труды СПбГМТУ, т. 1 2014, № 4(26), - с. 84-91
8. Современные разработки в области повышения механизации подводной сварки мокрым способом / Ли Д.С., Карпов В.М., Мурзин В.В., //Труды СПбГМТУ 2014, Морские интеллектуальные технологии, №2(24) Т.2, 2014 - с71-75.
9. Цифровое управление сварочным процессом / Лебедев В.А., Владимиров А.В., Хабuzов В.А.// Научные технологии в машиностроении №1 2014, с 14-22.

#### References

1. S.Yu. Maksimov, R.N.Ryzhov, E.A.Prilipko, V.A.Kozhukhar'. (2003) Vliyanie vneshnego elektromagnitnogo vozdeystviya na sodержание vodoroda pri mokroy podvodnoy svarke. Avtomaticheskaya svarka, 6,55-56.
2. B. E. Paton, V. A. Lebedev, S. Yu. Maksimov. (2011). Sovershenstvovanie oborudovaniya dlya podvodnoy mekhanizirovannoy i avtomatizirovannoy svarki i rezki poroshkovoy provolokoy. Svarka i Diagnostika, 5, 54-59.
3. Zaytseva N.V. (2008). Podvodnaya svarka v peremennom magnitnom pole. Institut metallofiziki im. G.V. Kurdyumova NAN Ukrainy. Kiev. Mezhdunarodnaya konferentsiya “Sovremennye problemy fiziki materia-lov”, Kiev, 7-8 okt., 2008; Sbornik tezisov. Kiev: IMF “PET”, 253. Rus.
4. Voropaev A.O.,Karpov V.M., Li D.S., Samoylenko R.S. (2014) Otsenka vliyaniya elektromagnitnogo vozdeystviya na strukturu metalla shva, vypolnennogo avtomaticheskoy svarkoy pod vodoy. Morskie i ntektual'nye tekhnologii 4(26) Т.1 2014, 80-84.
5. Shifrin I. N., Tselikov A. A., Grachev V.G. (2003)

- Sistemy elektromagnitnogo peremeshvaniya dlya promyshlennykh mashin nepreryvnogo lit'ya stali. Tyazheloe mashinostroenie (№5),2003, 7-12.
6. V. Grachev, L. Kuz'mina, F. Solodovnik, I. Shifrin, A. Tselikov, A. Rotenberg  
Sistemy elektromagnitnogo peremeshvaniya zhidkoy stali na sortovykh, blyumovykh i slyabovykh MNLZ. Natsional'naya metallurgiya: Oborudovanie (tekhnicheskii al'manakh)(4), 2005, 48-52
  7. V.M. Karpov, A.V. Vladimirov, V.V. Murzin  
Uproshchennoe programmirovaniye svarochnykh protsessov na java-sovmestimom yazyke vvoda komand XML. Morskie intelektual'nye tekhnologii: Trudy SPbGMTU, t. 1 2014, № 4(26), 84-91
  8. Li D.S., Karpov V.M., Murzin V.V. (2014)  
Sovremennye razrabotki v oblasti povysheniya mekhanizatsii podvodnoy svarki mokrym sposobom. Trudy SPbGMTU 2014, Morskie intelektual'nye tekhnologii, №2(24) T.2, 2014 - s71-75.
  9. Lebedev V.A., Vladimirov A.V., Khabuzov V.A. (2014)  
Tsifrovoe upravlenie svarochnym protsessom. Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii №1 2014, s 14-22.

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

УДК 536.24

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ В ТРУБНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ГОФРИРОВАННЫМИ ЛЕНТОЧНЫМИ ВСТАВКАМИ С НАДРЕЗАМИ НА РИСК ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА

**Медведев Валерий Викторович**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

**Лакиза Максим Владимирович**

аспирант кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: lakiza-m@hiprom.ru

#### Аннотация

В работе представлены результаты расчетной оценки влияния интенсификации конвективного теплообмена в трубе на риск загрязнения поверхностей теплообмена, приводящего к нежелательному снижению параметров судового водо-водяного теплообменного аппарата. Исследование выполнено на разработанном авторами оригинальном программном комплексе, с использованием результатов моделирования работы теплообменника в лицензионном программном обеспечении Xchanger Suite v.7.2 при поддержке компаний HTRI и Нева-Теплотехника.

В исследовании применялось имитационное моделирование, в процессе которого на основе массивов статистических испытаний определялась вероятность отказа. Случайные значения толщины отложений в трубном пространстве с морской водой в качестве теплоносителя, устанавливались методом Монте-Карло. В трубах теплообменника размещались интенсифицирующие ленточные вставки. В ходе расчетов были исследованы 4 образца ленточного интенсификатора, отличающиеся друг от друга величиной относительного шага закрутки  $s/d$  и надрезов  $t/d$ . Приведены рекомендации по применению интенсификации для снижения риска загрязнения.

**Ключевые слова:** Интенсификация теплообмена, ленточные интенсификаторы, коэффициент теплоотдачи, гидравлическое сопротивление, загрязнение поверхности, судовые теплообменные аппараты, риск.

### ASSESSMENT OF THE IMPACT OF INTENSIFICATION IN THE TUBE SPACE OF THE CORRUGATED TAPE INSERTS WITH NOTCHES ON THE RISK OF CONTAMINATION OF HEAT EXCHANGE SURFACES

**Medvedev Valery Viktorovich**

Dr. Sci. Tech., associate professor, professor of department of marine combustion engine and diesel plant  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

**Lakiza Maksim Vladimirovich**

Graduate student of department of marine combustion engine and diesel plant  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: lakiza-m@hiprom.ru

**Abstract**

The paper presents the results of the convective heat transfer effect estimating in the tube on the fouling risk of heat exchange surfaces leads to the undesirable decrease in parameters of marine water-to-water heat exchanger. The study was performed at the authors developed an original software package, using the results of simulation of the heat exchanger in the licensed software Xchanger Suite V. 7.2 with the support of HTRI and Neva-Teplotecnica companies.

The simulation modeling is used in the study, which is based on massive statistical tests determine the probability of failure. Random values of the fouling thickness in the tube with sea water as the coolant, were established by Monte Carlo method. Twisted tapes were placed in the tubes of the heat exchanger. 4 samples of tape were tested in the calculations, which differ in relative twist step  $s/d$  and cuts  $t/d$ . Recommendations for the use of intensification to reduce the risk of contamination.

**Key words:** Heat transfer enhancement, twisted tape, heat-transfer coefficient, hydraulic resistance, surface fouling, marine heat exchangers, risk.

**Введение**

Учет влияния отложений на эксплуатацию судовых теплообменных аппаратов (ТА) требует при проектировании опираться на некоторое предельно допустимое, для штатной эксплуатации СЭУ, значение загрязнения. Поэтому при проектировании необходимо назначать запас теплообменной поверхности (обыкновенно 15-20% и более), а при эксплуатации – учитывать возможное снижение параметров энергетической установки в целом и вывод ее из эксплуатации для очистки поверхностей теплообмена при превышении этого значения.

Наличие отложений на теплообменной поверхности приводит к нескольким последствиям, влияющим на параметры работы ТА. Среди этих параметров можно выделить следующие: тепловую мощность (теплопроизводительность) теплообменника, температуру теплоносителей на выходе из теплообменника и гидравлическое сопротивление теплообменника по стороне накопления отложений. Первые два параметра связаны с величиной термического сопротивления слоя отложений и с уменьшением коэффициента теплоотдачи, вызванным уменьшением скорости теплоносителя из-за стеснения проходного сечения отложением (при постоянном напоре, создаваемом циркуляционным насосом). Эти два параметра представляют собой характеристику одного и того же процесса теплопередачи. Они важны, так как изменение тепловой мощности сказывается на тепловом состоянии охлаждаемого объекта СЭУ (например, дизеля) и комплексно влияет на надежность и безопасность его работы. Наиболее просто поддается прямому измерению температура, поэтому именно этот параметр удобно использовать при назначении предельно допустимого значения  $T_{гр}$ , характеризующего штатный режим работы ТА.

Гидравлическое сопротивление ТА является не менее важным параметром, характеризующим работу теплообменника. Особенно значимым он становится при использовании интенсификации теплообмена. Дело в том, что при интенсификации возможно уменьшение габаритов ТА, но чаще всего при этом растет гидравлическое сопротивление и оно

приближается к границе допустимых значений  $\Delta p_{пр}$ , которая назначается при проектировании гидравлической части системы охлаждения. Этот параметр просто поддается прямому измерению, поэтому его удобно использовать при назначении предельно допустимого значения, характеризующего штатный режим работы ТА.

В такой ситуации назначение излишнего запаса теплообменной поверхности означает дополнительный рост гидравлического сопротивления, связанного с размерами ТА, что приближает к исчерпанию запаса по гидравлическому сопротивлению. Проявляются противоречивые требования, которые требуют решения задачи нахождения приемлемого компромисса, позволяющего обоснованно назначать величину запаса теплообменной поверхности.

Решение этой задачи требует тщательного рассмотрения самого процесса загрязнения теплообменных поверхностей ТА и влияющих на этот процесс параметров, в частности – интенсификации теплообмена.

**1. Влияние интенсификации теплообмена на рост отложений**

Параметры, которые влияют на процесс загрязнения, могут быть классифицированы следующим образом: время, рабочие параметры (температура, скорость, тепловой поток и давление), свойства жидкости и параметры конструкции теплообменника. К последним можно отнести и средства интенсификации теплообмена, например, за счет создания искусственной шероховатости поверхности теплообмена или использования ленточных вставок.

Приведенные в [1] данные могут привести к убеждению, что относительное снижение теплоотдачи при развитии отложений на теплообменной поверхности для канала с искусственной шероховатостью будет больше, чем на гладкой. Однако, данные разных экспериментальных исследований показывают, что на самом деле искусственная шероховатость снижает уровень отложений за счет системы вихрей, которую они генерируют вблизи поверхности. Данное противоречие можно объяснить тем,

что большое количество указанных выше факторов, влияющих на процесс роста отложений, приводит к тому, что при определенном их сочетании, например, при небольших скоростях загрязненного потока и небольшой глубине искусственной шероховатости поверхности, эффект снижения теплоотдачи есть, при других параметрах – наблюдается обратный эффект.

Известны примеры, которые показывают, что для сильно загрязненных потоков рост загрязнения теплообменной поверхности в интенсифицированных каналах оказываются существенно ниже, чем в гладких.

Исследование возможности снижения солеотложений на поверхностях теплообмена с помощью искусственной турбулизации выполнено в работе [2]. В ней изложены результаты экспериментов при обтекании водой повышенной жесткости наружной и внутренней поверхностей труб с различными параметрами кольцевых турбулизаторов. Скорость воды изменялась в пределах 0,1-1,5 м/с, температура 50-90°C, длительность эксперимента до 360 ч. В результате этих опытов были получены зависимости термического сопротивления слоя солеотложений  $R_f$  снаружи и внутри труб от параметров турбулизаторов, скорости воды и времени.

Наличие турбулизаторов в 3-5 раз снижает солеотложения на обеих поверхностях труб, причем зависимость  $R_f$  от времени имеет асимптотический характер, через 100-150 ч значение  $R_f$  становится постоянным [3].

Отмечено, что отложения в трубах с турбулизаторами тем меньше, чем больше высота диафрагм или глубина канавок и чем меньше шаг их размещения. Можно отметить, что при течении воды повышенной жесткости (до 20 мг.экв/л) в трубах с диафрагмами за 100 ч работы коэффициент теплообмена упал не более чем на 10%, а гидравлическое сопротивление почти не изменилось. Для гладкой трубы за это время коэффициент теплообмена упал на 30%, а сопротивление выросло на 25%. Поэтому эффективность труб с турбулизаторами увеличивается при наличии солеотложений. Если при их отсутствии коэффициент теплообмена увеличивается в 1-2,5 раза, то через 300 ч работы при наличии солеотложений это отношение возрастет до 3,5-5.

Эти эксперименты показали, что поскольку солеотложения снаружи и внутри труб с турбулизаторами значительно меньше, чем в гладких, это позволяет при использовании таких труб обеспечить устойчивую работу теплообменных аппаратов без специальных мероприятий по очистке поверхностей.

Исследование проблемы уменьшения соле- и коксоотложений на теплообменных поверхностях путем искусственной турбулизации потока выполнено в работах [4]-[6]. Турбулизация потока в пристенной зоне, реализовывалась для трубчатых теплообменников с помощью олунения или накатки, кольцевой или спиральной [4], [6].

Уменьшение соле- и коксоотложений в этих каналах можно объяснить, принимая в рассмотрение интенсивный обмен порциями жидкости между пристенным слоем и ядром потока в них. В этом случае современные концепции механизмов солеотложения на гладких поверхностях [7], [8] могут быть также использованы при создании качественной модели, описывающей процесс соле- и коксоотложений в

интенсифицированных трубах (при закрутке потока и при дискретных турбулизаторах потока).

В работе [9] на основе обработки экспериментальных данных предложена зависимость термического сопротивления слоя солеотложений в трубах

$$R_f = 11,8 Re^{-0,29} C^{0,214} (t/t_c)^{0,129} (d_n / D_{тр})^{0,7} (0,062 + 1,2 \cdot 10^{-3} S/D_{тр}), \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $t_c$  – промежуток времени, который определяется из условия достижения термическим сопротивлением  $R_f$  некоторого значения, достаточно близкого к асимптотическому значению  $R_{f\infty}$ ;  $C$  – концентрация соли (карбонатной жесткости воды);  $D_{тр}$  – диаметр трубы;  $S$  – шаг накатки;  $d_n$  – величина, определяемая по соотношению  $d_n = D_{тр} - 2\delta_n$ ;  $\delta_n$  – глубина накатки.

В работе [10] приведены результаты исследования изменения термического сопротивления в параллельно расположенных гладкой трубе и трубе с проволочным интенсификатором типа hiTRAN при прокачке через них нефтепродуктов. Выявлено, что наличие интенсификатора в трубе резко снижает величину термического сопротивления и замедляет скорость его роста.

## 2. Исследование методом ИМ влияния случайного характера накопления отложений на параметры работы теплообменника с интенсификацией

Анализа приведенных в разделе 1 экспериментальных данных позволил сделать вывод о том, что выражение (1), как и аналогичные ему выражения, описывают скорее математическое ожидание значений термического сопротивления, а реальные значения будут иметь случайные отклонения от них, которые можно характеризовать неким законом распределения  $f(R_f)$  со своими параметрами (рис.1). Обработка данных разных авторов показала, что чаще всего подходит нормальный закон распределения, как при отсутствии интенсификации, так и с интенсификацией. Это характерно для случаев, когда на процесс роста толщины загрязнения влияют несколько разнонаправленных факторов. Коэффициент вариации лежит в диапазоне  $V = 0,05-0,4$ . Следует отметить, что на значение  $R_{f\infty}$  оказывает влияние интенсификация теплообмена. При этом можно выделить два случая. Первый, когда термическое сопротивление в бесконечное время для гладкой трубы (без интенсификатора) и трубы с интенсификатором совпадают  $R_{f\infty} = R_{f\infty}^{ИИТ}$  (рис.1,а). Второй, когда термическое сопротивление для трубы без интенсификатора и трубы с интенсификатором не совпадают, причем  $R_{f\infty} > R_{f\infty}^{ИИТ}$  (рис.1,б). В обоих случаях время достижения термического сопротивления в бесконечное время (по сути, время до появления необходимости очистки поверхности теплообмена) для случая с интенсификатором больше, чем без него. Законы распределения  $f(R_f)$  и  $f_{ИИТ}(R_f)$  и их параметры могут различаться.

Как отмечалось ранее, формирование отложений представляет собой сложный характер и зависит от множества факторов. В свою очередь степень влияния различных факторов различна и, зачастую, определить вклад того или иного параметра с учетом влияния остальных не представляется возможным. Поэтому в было принято решение исследовать методом имитационного моделирования (ИМ) влияние случайного характера накопления отложений на

параметры работы теплообменника с интенсификацией.

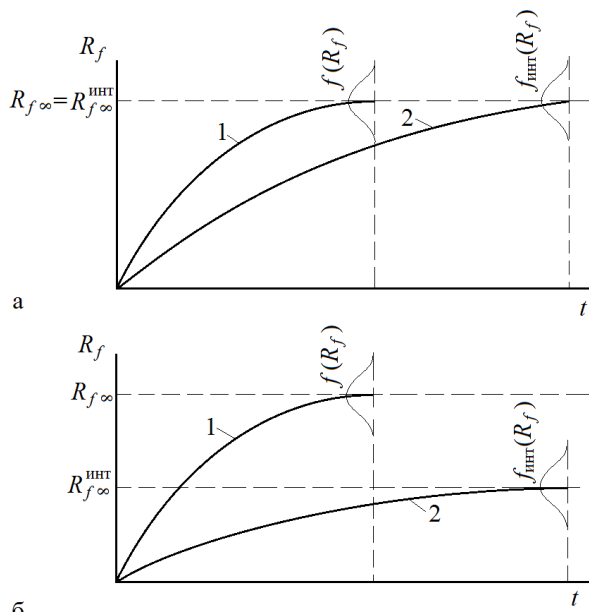


Рис.1. Зависимости термического сопротивления загрязнения  $R_f$  от времени  $t$ :  
1 – труба без интенсификатора; 2 – труба с интенсификатором

Метод ИМ был применен в работе [11] для моделирования загрязнения теплопередающих поверхностей ТА. Однако использованный там алгоритм не учитывает стохастический характер роста отложений. В данной работе основной упор сделан на учет этого фактора, поскольку сделанные в [12] выводы показали существенность его влияния на процесс работы теплообменника. Новизной является учет интенсификации теплообмена.

Определение параметров гидродинамики и тепло- и массообмена в каналах ТА удобно делать, опираясь на модели структуры потоков, теории пограничного слоя и турбулентной миграции частиц, а также развития гидродинамической аналогии [13] или, например, на результаты совершенствования методик расчета внутренних задач гидродинамики и тепло-массообмена на основе новой, разработанной В.А. Павловским, дифференциальной феноменологической модели течения вязкой несжимаемой жидкости – f-модели [14]. Этому способствует развитие методов компьютерной гидродинамики (CDF). Однако, сложные граничные условия, характерные при использовании ленточных интенсификаторов, снабженных дополнительными элементами (гофрамы, разрезами), затрудняют использование CDF-технологии, поэтому экспериментальные исследования остаются важной, а зачастую единственной возможностью решить задачу. В данном исследовании использованы экспериментальные аналитические зависимости для определения значений критерия Нуссельта и коэффициента гидравлического сопротивления из работы [15].

ИМ проводилось согласно методу, изложенному в работе [12], который можно применять при исследовании ТА как с интенсификацией, так и без нее. Как и в [12], для получения количественной оценки получаемого эффекта, работа водо-водяного

теплообменника номинальной теплопроизводительностью  $W_{ном} = 1070$  кВт с площадью теплообменной поверхности  $13 \text{ м}^2$  сначала моделировалась в лицензионном программном обеспечении Xchanger Suite v.7.2 компании HTRI (США). Расчеты выполнялись в программном модуле Xist для кожухотрубных теплообменных аппаратов с ленточными интенсификаторами, расположенными в трубном пространстве. Исследовались четыре типа интенсификаторов из работы [15], отличающихся друг от друга величиной относительного шага закрутки  $s/d$  и надрезов  $t/d$ . Выполнено несколько вычислений для характерных режимов: с чистой поверхностью теплообмена (без отложений); с отложениями при низкой, средней и высокой степени загрязнения.

По результатам расчетов, на основе интерполяционного многочлена Лагранжа, были получены аналитические зависимости, которые использовались при статистических испытаниях в разработанной авторами программе на алгоритмическом языке Borland Delphi [16]. В программе предусмотрена возможность выбора закона распределения и задания его параметров (рис.2).

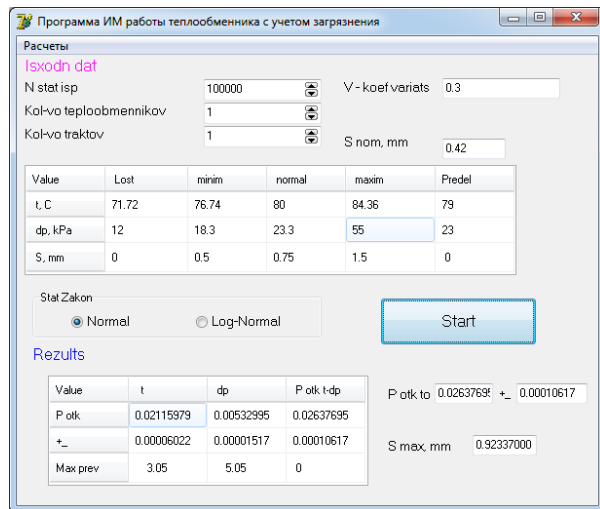


Рис.2. Диалоговое окно программы

Для удобства сравнения с результатами расчетов без интенсификации из работы [12] толщина загрязнения, соответствующая  $W_{ном}$ , составляла  $\delta_{ном} = 0,42$  мм ( $R_{f, \infty} = 0,00014 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ ). Эта величина использована, как математическое ожидание толщины загрязнения, относительно которой разыгрывались случайные значения по нормальному закону распределения. В качестве определяющих параметров назначены предельное значение температуры  $T_{пр} = 79^\circ\text{C}$  и перепад давления теплоносителя  $\Delta p_{пр} = 7$  кПа. Статистические испытания проведены при  $V = 0,3$  и  $N_{исп} = 100000$ .

### 3. Результаты исследований и их анализ

Согласно [12], оценки риска эксплуатации теплообменника в период роста толщины загрязнения оценивались по значению вероятности  $P$  превышения по уровню температур  $T$ ,  $\Delta p$  и в целом для теплообменника. Расчеты показали, что вероятность отказа резко возрастала при использовании интенсификации, т.к. существенный рост гидравлического



сопротивления в трубном пространстве превышал предельное значение  $\Delta p_{пр}$ . Это означает, что при наличии ограничения по гидравлическому сопротивлению теплообменника применять интенсификацию не целесообразно, что справедливо не только при отсутствии отложений, но и без них. В этом случае необходимо применять механическую или химическую очистку поверхностей теплообмена для предотвращения снижения теплопроизводительности ТА ниже допустимых значений. Однако, если параметры системы, в которую включен ТА, позволяют увеличить  $\Delta p_{пр}$ , то ситуация меняется и применение интенсификации позволяет уменьшить  $P$ . Расчеты показали, что при  $\Delta p_{пр} = 23$  кПа (определен, как и в [12], из условия нежелательности уменьшения теплопроизводительности теплообменника более чем на 20%) вероятность отказа исследованного теплообменника без интенсификации составила  $P = (3,80 \pm 0,01)\%$ . При этом вероятность превышения по уровню  $\Delta p$  была равна нулю. При интенсификации  $P$  находилась в диапазоне от  $2,05 \pm 0,01\%$  (уменьшилась практически в два раза по сравнению случая без интенсификатора) до  $4,18 \pm 0,02\%$ . При этом лучший результат по снижению  $P$  показала гофрированная лента с надрезами с параметрами  $s/d = 7$  и  $t/d = 1$ . Она обеспечивает меньшую величину интенсификации теплообмена по сравнению с другими образцами, но оказывает и меньшее гидравлическое сопротивление [15]. При изучении ситуации, когда ограничения по  $\Delta p_{пр}$  нет,  $P$  находилось в диапазоне от  $1,36 \pm 0,00\%$  до  $2,22 \pm 0,01\%$ . Лучший результат показала лента с параметрами  $s/d = 7$  и  $t/d = 0,5$ . Она обеспечивает наибольшую величину интенсификации теплообмена по сравнению с другими образцами. Ожидаемо лента создает большее гидравлическое сопротивление [15].

В проведенном исследовании реализовывался сценарий роста отложений соответствующий рис.1.а. Когда есть основания для реализации сценария с рис.1.б, можно ожидать лучшего результата. Применение интенсификации целесообразно в том случае, если механическая или химическая очистка не желательна или есть необходимость в увеличении периода эксплуатации между очистками, а ограничения по  $\Delta p_{пр}$  приемлемы или отсутствуют. Наибольший эффект можно достигнуть если задачу решать не путем введения интенсификаторов в ТА без интенсификатора, а уже при проектировании теплообменника с учетом интенсификации и накопления отложений, когда можно варьировать конструктивное выполнение при сохранении заданной теплопроизводительности. Таким образом, по сути, затраты на очистку поверхности ТА и вывод его из эксплуатации, заменяются затратами на преодоление дополнительного гидравлического сопротивления при достижении большего значения коэффициента готовности теплообменника.

### Заключение

Определение значения величины вероятности нежелательного события  $P$ , позволит лицам, принимающим окончательное решение, обосновано предпринимать дальнейшие действия, в частности при назначении запасов площади теплообмена при проектировании или периода очистки ТА при эксплуа-

тации при интенсификации теплообмена в условиях загрязнения поверхности теплообмена.

Авторы выражают признательность компаниям Нева-Теплотехника и HTRI за поддержку в проведении данных исследований.

## Литература

9. Brusilovsky M., Borden J. and Hasson D., Flux Decline due to Gypsum Precipitation on RO Membranes. Desalination, 1992. 86. – PP. 187-222.
10. Дрейцер Г.А. Исследования солеотложений при течении воды с повышенной карбонатной жесткостью в каналах с дискретными турбулизаторами // Теплоэнергетика. – 1996. – №3. – С.30-35.
11. Дрейцер Г.А. О некоторых проблемах создания высокоэффективных трубчатых теплообменных аппаратов // Новости теплоснабжения. – 2004. – №5. – С.32-37.
12. Heat transfer: Soviet reviews, Vol.2. Enhancement of heat transfer / Dreitser G.A., Dubrovskiy Ye.V., Dzyubenko B.V. et al. Eds. A.A. Zukauskas, E.K. Kalinin, and J. Taborek, New York: Hemisphere, 1990. – 273 p.
13. Turbulent flow and heat transfer in channels of power plant / Dzyubenko B.V., Sakalauskas A., Ashmantas L.V., et al. Ed. B.V. Dzyubenko. Vilnius: Pradai, 1995. – 300 p.
14. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Копп И.З., Мякочин А.С. Эффективные поверхности теплообмена. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 407 с.
15. Kim M.-H., Webb R.L. Particulate fouling inside tubes having a re-shaped two-dimensioned roughness by a flowing suspension of aluminium oxide in water // Proc. 9th Int. Heat Transfer Conference 1990, New York: Hemisphere 1990. – Vol.5, – PP.139-144.
16. Müller-Steinhagen H. Fouling: The ultimate challenge for heat exchanger design // Transport Phenomena in Thermal Engineering, New York: Begell House, Inc. Publishers, 1993. – Vol.2. – PP.811-823.
17. Dzyubenko B.V., Myakochin A.S. Heat transfer enhancement in salt depotions inside tubes with flow swirling and discrete turbulence promoters // Journal of Thermal Processes in Engineering, 2010. – Vol.2. – №7. – PP.329-335.
18. Crittenden B.D., Kolaekowski S.T., Takemoto T. Use of in-tube inserts to reduce fouling from crude oils // paper to be presented at the 29<sup>th</sup> AIChE Heat Transfer Meeting, Atlanta, 8-11 August, 1993. – 19 p.
19. Равин А.А. Диагностическое обеспечение судового энергетического оборудования: проблемы и решения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Равин Александр Александрович. – СПб., 2016. – 39 с.
20. Медведев В.В., Лакиза М.В. Оценка риска при проектировании и эксплуатации судовых теплообменных аппаратов с учетом загрязнения поверхностей теплообмена // Морской вестник. – СПб., – 2016, – №4(60). – С. 59-62.
21. Лаптев А.Г., Башаров М.М. Эффективность тепломассообмена и разделения гетерогенных сред в аппаратах нефтегазохимического комплекса: монография. – Казань: Центр инновационных технологий, 2016. – 344 с.
22. Павловский В.А., Чистов А.Л., Шестов К.В. Моделирование течений в трубах с шероховатыми стенками сечения // Морские интеллектуальные технологии. – 2016, №4(34). Т.1. – С.109-113.
23. Лакиза М.В. Интенсификация теплообмена в трубном пространстве гофрированными ленточными вставками с надрезами // Морские интеллектуальные технологии. – 2017, №1(35). Т.1. – С.39-42.
24. Медведев В.В., Лакиза М.В. Программа расчета вероятности безотказной работы функционально связанных судовых теплообменных аппаратов с учетом стохастического процесса загрязнения теплопередающих поверхностей / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015616702. – М., 2015.

## References

18. Brusilovsky M., Borden J. and Hasson D. Flux Decline due to Gypsum Precipitation on RO Membranes. Desalination, 1992.86. pp. 187-222.
19. Dreitser G.A. Issledovaniya soleotlozheniy pri techenii vody s povyshennoy karbonatnoy zhestkost'yu v kanalah s diskretnymi turbulizatorami [The study of scaling in the flow of water with high carbonate hardness in channels with discrete turbulence]. Teploenergetika [Thermal Engineering]. 1996, N 3. pp.30-35. (In Russian)
20. Dreitser G.A. O nekotorykh problemakh sozdaniya vysokoeffektivnykh trubchatykh teploobmennykh apparatov [About some problems of creating highly efficient tubular heat exchangers]. Novosti teplosnabgeniya. 2004, N5. pp.32-37. (In Russian)
21. Dreitser G.A., Dubrovskiy Ye.V., Dzyubenko B.V. et al. Heat transfer: Soviet reviews, Vol.2. Enhancement of heat transfer. Eds. A.A. Zukauskas, E.K. Kalinin, and J. Taborek, New York. Hemisphere Publ., 1990. 273 p.
22. Dzyubenko B.V., Sakalauskas A., Ashmantas L.V., et al. Turbulent flow and heat transfer in channels of power plant. Ed. B.V. Dzyubenko. Vilnius, Pradai Publ., 1995. 300 p.
23. Kalinin E.K., Dreitser G.A., Kopp I.Z., Myakochin A.S. Effektivnyye poverkhnosti teploobmena [Effective heat exchange surface]. Moskow, Energoatomizdat Publ., 1998. 407 p. (In Russian)
24. Kim M.-H., Webb R.L. Particulate fouling inside tubes having a re-shaped two-dimensioned roughness by a flowing suspension of aluminium oxide in water. Proc. 9th Int. Heat Transfer Conference 1990, New York. Hemisphere Publ.. Vol.5, pp.139-144.
25. Müller-Steinhagen H. Fouling: The ultimate challenge for heat exchanger design. Transport Phenomena in Thermal Engineering, New York: Begell House, Inc. Publishers, 1993, Vol.2, pp.811-823.

26. Dzyubenko B.V., Myakochin A.S. Heat transfer enhancement in salt depotions inside tubes with flow swirling and discrete turbulence promoters. *Journal of Thermal Processes in Engineering*, 2010, Vol.2, N 7, pp.329-335.
27. Crittenden B.D., Kolaezkowski S.T., Takemoto T. (1993) Use of in-tube inserts to reduce fouling from crude oils. Paper to be presented at the 29<sup>th</sup> AIChE Heat Transfer Meeting, Atlanta, 8-11 August. 19 p.
28. Ravin A.A. Diagnosticheskoe obespechenie sudovogo energeticheskogo oborudovaniya: problemy i resheniya. Avtoref. dis...d-ra tekhn. nauk [Diagnostic security of the ship power equipment: problems and solutions. Dr. Sci. Tech. diss.]. Sankt-Petersburg, 2016. 39 p. (In Russian)
29. Medvedev V.V., Lakiza M.V. Otsenka riska pri proektirovanii i ekspluatatsii sudovykh teploobmennykh apparatov s uchetom zagryazneniya poverkhnostey teploobmena [Risk assessment at designing and operation of ship heat exchangers taking into account heat-exchange surfaces contamination]. *Morskoy Vestnik*. 2016, N 4(60), pp. 59-62. (In Russian)
30. Laptev A.G., Bacharov M.M. Effektivnost' teplomassoobmena i razdeleniya geterogennykh sred v apparatakh neftegazokhimicheskogo kompleksa [Efficiency of heat and mass transfer and separation of heterogeneous media in apparatuses of the oil and gas chemical complex]. Kazan. Tsentr innovatsionnykh tekhnologiy [Center for Innovation Technologies] Publ., 2016. 344 p. (In Russian)
31. Pavlovsky V.A., Chistov L.A., Shestov K.V. Modelirovanie techeniy v trubakh s sherokhovatyimi stenkami secheniya [Modeling turbulent flow in a rough pipe]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii* [Marine Intelligent Technologies]. 2016, N 4(34), V1, pp.109-113. (In Russian)
32. Lakiza M.V. Intensifikatsiya teploobmena v trubnom prostranstve gofrirovannymi lentochnymi vstavkami s nadrezami [Heat transfer enhancement in tube side by corrugated twisted tape with cuts]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii* [Marine Intelligent Technologies]. 2017, N 1(35), V1, pp.39-42. (In Russian)
33. Medvedev V.V., Lakiza M.V. Programma rascheta veroyatnosti bezotkaznoy raboty funktsional'no svyazannykh sudovykh teploobmennykh apparatov s uchetom stokhasticheskogo protsessa zagryazneniya teploperedayushchikh poverkhnostey [The program of calculation of probability of failure-free operation of functionally related marine heat exchangers, given a stochastic process contamination of heat transfer surfaces]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM [The certificate on the state registration of the computer program] N 2015616702, Moscow, 2015. (In Russian)

УДК 536.24

## РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ЛЕНТОЧНЫМИ ВСТАВКАМИ С НАДРЕЗАМИ НА РАБОТУ СУДОВЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ

**Медведев Валерий Викторович**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

**Лакиза Максим Владимирович**

аспирант кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: lakiza-m@hiprom.ru

### Аннотация

В работе представлены результаты сравнения теплогидравлических характеристик интенсификаторов выполненных в виде ленточных вставок с разрезами, работающих как в воде, так и в масле, позволяющие обосновать выбор рациональных параметров данных интенсификаторов теплоотдачи для достижения максимальных значений теплогидравлической эффективности. Произведена расчетная сравнительная оценка влияния интенсификации конвективного теплообмена в трубе на работу судовых кожухотрубных теплообменных аппаратов, водо- и маслоохладителей. Исследование проведено на базе аналитических зависимостей для расчета теплообмена и гидравлического сопротивления для ленточных профилированных вставок с разрезами полученных авторами в результате экспериментальных исследований. Моделирование работы теплообменников выполнено в лицензионном программном обеспечении Xchanger Suite v.7.2 при поддержке компаний Н-Пром Бюро, HTRI и Нева-Теплотехника. Даны практические рекомендации по использованию исследованных интенсификаторов теплообмена в судовых кожухотрубных теплообменных аппаратах.

**Ключевые слова:** Интенсификация теплообмена, ленточные интенсификаторы, коэффициент теплоотдачи, гидравлическое сопротивление, судовые теплообменные аппараты, теплогидравлическая эффективность.

## NUMERICAL INVESTIGATION OF INFLUENCE OF INTENSIFICATION MALOOB-MAN BAND INSERTS WITH NOTCHES ON THE JOB OF MARINE COOLERS

**Medvedev Valery Viktorovich**

Dr. Sci. Tech., associate professor, professor of department of marine combustion engine and diesel plant  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

**Lakiza Maksim Vladimirovich**

Graduate student of department of marine combustion engine and diesel plant  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: lakiza-m@hiprom.ru

**Abstract**

The paper presents the results of the comparison of thermal-hydraulic characteristics of the intensifiers are made in the form of a belt, split panels, working both in water and in oil, allowing to prove a choice of rational parameters data of intensifiers of heat transfer for maximum values of thermal and hydraulic efficiency. Produced the calculated comparative evaluation of the effect of convective heat transfer in the pipe work marine shell-and-tube heat exchangers, water and oil coolers. The study was conducted on the basis of the analytical dependencies for calculating heat transfer and hydraulic resistance for a tape shaped split panels obtained by the authors in experimental studies. Simulation of the heat exchangers is made in the licensed software Xchanger Suite V. 7.2 supported by Hi-Prom Bureau, HTRI and Neva-Teplotechnica Ltd. Practical recommendations for the using of the studied inserts in heat exchangers are provided.

**Key words:** Heat transfer enhancement, twisted tape, heat-transfer coefficient, hydraulic resistance, marine heat exchangers, thermohydraulic efficiency.

**Введение**

Повышение эффективности и надежности судовых кожухотрубных теплообменных аппаратов (ТА) является актуальной задачей в свете как выполнения Программы развития отечественного судостроения, так и повышения энергетической эффективности и надежности СЭУ при ее модернизации [1]. Перспективными методами для решения указанных задач является интенсификация теплообмена, среди этих методов высокими показателями энергетической эффективности обладают те, которые реализуют воздействие на пристенный пограничный слой закрученных потоков рабочей жидкости. Закутку осуществляют, в частности, с помощью ленточных вставок. Несмотря на то, что применение ленточного интенсификатора хорошо известно [2], исследования его различных конструкций для получения более эффективных турбулизаторов активно ведутся до настоящего времени. Получение такого повышенного эффекта, возможно за счет дополнительного увеличения скорости и повышения турбулентности потока. Достигается этот результат при помощи изменения конструкции лент в пристенной области трубного пространства – применения надрезов с различной глубиной и шагом, деформирования ленты по периметру. Авторами был исследован целый ряд оригинальных конструкций ленточных вставок с надрезами [3]-[4]. В данной работе представлены результаты сравнения теплогидравлических характеристик этих интенсификаторов. Однако, для сравнения различных турбулизаторов необходимо иметь также метод оценки, дающий объективное сравнение вставок по всем основным параметрам – тепловому потоку, мощности на прокачку теплоносителя и площади теплообмена. Поскольку реальные судовые теплообменники имеют более сложную конструкцию, чем рабочий участок экспериментального стенда, на котором получены аналитические зависимости для расчета гидродинамики и теплообмена, то представляет практический ин-

терес исследование теплогидравлических характеристик ТА в целом. Для получения количественной оценки получаемого эффекта, работа теплообменника моделировалась в лицензионном программном обеспечении Xchanger Suite v.7.2 компании HTRI (США). Расчеты выполнялись в программном модуле Xist для кожухотрубных теплообменных аппаратов с ленточными интенсификаторами, расположенными в трубном пространстве.

**1. Сравнение теплогидравлических характеристик ленточных интенсификаторов**

В табл. 1 и 2 приведена оценка влияния различных параметров ленточных интенсификаторов по сравнению с гладкой трубой на степень увеличения коэффициента теплоотдачи и гидравлического сопротивления для исследованных диапазонов числа Рейнольдса  $Re$ .

*Таблица 1*

Степень увеличения коэффициента теплоотдачи и гидравлического сопротивления ленточных интенсификаторов (средние значения) по сравнению с гладкой трубой на воде

Тип и параметры ленты	$Nu/Nu_{rn}$	$\xi/\xi_{rn}$	$(Nu/Nu_{rn})/\xi/\xi_{rn}$
Гофрированная лента с надрезами $s/d=7$ и $t/d=0,5$	1,84	4,26	0,43
Гофрированная лента с надрезами $s/d=12,5$ и $t/d=0,5$	1,63	3,92	0,37
Гофрированная лента с надрезами $s/d=7$ и $t/d=15$	1,84	3,84	0,47
Гофрированная лента с надреза-	1,61	3,84	0,42

ми $s/d=12,5$ и $t/d=1$			
Профилированная лента с надрезами $s/d=7$ и $t/d=0,5$	1,5	7,07	0,21
Профилированная лента с надрезами $s/d=7$ и $t/d=1$	1,3	5,51	0,24

Установлено, что при уменьшении относительного шага скрутки  $s/d$  и относительного шага поперечных надрезов  $t/d$  у всех ленточных интенсификаторов возрастает уровень теплоотдачи, и вместе с ним, гидравлического сопротивления в трубе. Теплогидравлическая эффективность "гофрированной ленты" выше во всем диапазоне значений чисел  $Re$ . Это обусловлено отсутствием изгибов кромки ленты в местах надрезов, что вызывает опережающее снижение степени гидравлического сопротивления по сравнению с коэффициентом теплоотдачи в трубе. При использовании воды в качестве теплоносителя в трубном пространстве, степень увеличения гидравлического сопротивления происходит с опережающей скоростью по сравнению с теплоотдачей, что является достаточно закономерным для пассивных методов интенсификации. При использовании масла закономерность меняется – степень интенсификации опережает степень увеличения гидравлического сопротивления.

Таблица 2

Степень увеличения коэффициента теплоотдачи и гидравлического сопротивления ленточных интенсификаторов (средние значения) по сравнению с гладкой трубой на масле

Тип и параметры ленты	$Nu/Nu_{rn}$	$\xi/\xi_{rn}$	$(Nu/Nu_{rn})/\xi/\xi_{rn}$
Гофрированная лента с надрезами $s/d=7$ и $t/d=0,5$	7,88	5,58	1,41
Гофрированная лента с надрезами $s/d=12,5$ и $t/d=0,5$	6,74	4,33	1,56
Гофрированная лента с надрезами $s/d=7$ и $t/d=15$	7,54	4,69	1,6
Гофрированная лента с надрезами $s/d=12,5$ и $t/d=1$	6,19	4,17	1,49
Профилированная лента с надрезами $s/d=7$ и $t/d=0,5$	7,35	6,04	1,21
Профилированная лента с надрезами $s/d=7$ и $t/d=1$	6,35	4,7	1,34

2. Исследование теплогидравлических характеристик судовых охладителей воды

В ходе исследования интенсификации теплообмена типоразмерного ряда судовых ТА (табл.3) расчет проходит посредством занесения конструктивных данных аппарата, параметров рабочего процесса и теплофизических свойств теплоносителей для трубного и межтрубного пространства. Течение воды в трубном пространстве происходит при  $Re = 7000-22000$ .

Таблица 3

Данные конструкции судовых охладителей воды

Шифр аппарата	Высота, м	Длина, м	Диаметр корпуса, м	Масса, кг
20В.000.0 2	0,335	1,06	0,25	122
30В.04.00 0	0,566	0,692	0,375	200
40В.03.00 0	0,687	0,93	0,49	390

Все аппараты типоразмерного ряда судовых охладителей воды имеют теплообменную поверхность в виде трубок круглого сечения с наружным диаметром 12 мм и толщиной стенки 1 мм из мельхиора, расположенных в трубной решетке с шагом 16 мм. Количество ходов по трубному пространству – два. В межтрубном пространстве, также, расположены сегментные перегородки с вырезом для поперечного омывания пучка и увеличения теплоотдачи, что было учтено при расчете аппаратов в программном пакете Xchanger Suite при определении теплопроизводительности.

При сравнении теплосъема по исходным данным завода производителя и данных по расчету (табл. 4 и 5), ТА имеют запас по тепловой нагрузке 4-37%.

Таблица 4

Параметры работы охладителей воды на рабочих режимах

Шифр аппарата	Расход, м <sup>3</sup> /ч		Температура на входе, °С		Теплосъем, кВт	Перепад давления в трубах $\Delta P$ , кПа
	Трубно-пр-во	Межтруб.-пр-во	Трубно-пр-во	Межтруб.-пр-во		
20В.000.0 2	17,5	18,3	85	40	310	25
30В.04.00 0	51	39	72	33	380	54
40В.03.00 0	72	75	89	40	1070	10

Таблица 5

Результаты расчета охладителей воды на рабочих режимах

Шифр аппарата	Сред. коэф. теплоотдачи в труб. пр-ве, Вт/м <sup>2</sup> К	Козф-фициент теплопер., Вт/м <sup>2</sup> К	Температура на выходе, °С		Тепло-съем, кВт	ΔР, кПа
			Труб. пр-во	Межтруб. пр-во		
20В.000.02	5711,2	2423,3	69,47	54,97	322	7
30В.04.000	6108,9	2587,4	63,43	44,26	515	5,3
40В.03.000	5452,0	2508,1	71,81	56,65	1466	7,6

Моделирование процесса интенсификации теплообмена происходило в программной среде HTRI Xchanger Suite с использованием критериальных зависимостей для интенсификатора типа "гофрированная лента с надрезами", полученных в [4]. С помощью этих зависимостей в ходе расчета определялись коэффициент теплоотдачи и перепад давления в трубном пространстве теплообменника. Результаты расчетов приведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты расчета охладителей воды на рабочих режимах с применением интенсификаторов типа "гофрированная лента с надрезами"

Шифр аппарата	Сред. коэф. теплоотдачи в труб. пр-ве, Вт/м <sup>2</sup> К	Козф-фициент теплопер., Вт/м <sup>2</sup> К	Температура на выходе, °С		Тепло-съем, кВт	ΔР, кПа
			Труб. пр-во	Межтруб. пр-во		
20В.000.02	9275,4	3032,6	67,40	56,95	364	44,6
30В.04.000	9869,5	3226,2	62,00	46,14	601	36,9
40В.03.000	9004,3	3224,7	69,17	59,19	1670	38,1

Анализ результатов исследований, приведенных в табл. 6, позволяет сделать вывод, что при использовании в качестве интенсификаторов теплообмена вставки типа "гофрированная лента с надрезами" в трубном пространстве судовых охладителей воды, коэффициент теплоотдачи увеличился в 1,61-1,65 раз, а тепловая мощность теплообменников возросла на 13-16,7%.

**3. Исследование теплогидравлических характеристик судовых охладителей масла**

В работе [3] приведены результаты выполненных авторами сравнительных расчетов судового маслоохладителя типа МХД-16 в штатном исполнении и с интенсификаторами типа "профи-

лированная лента с надрезами". В данной работе исследованы охладители масла для дизелей и газовых двигателей выпускающиеся в соответствии с ГОСТ 13211-80. В отличие от гладкотрубных охладителей воды в маслоохладителях используют оребренную теплообменную поверхность, получаемую методом поперечно-винтовой накатки. Все аппараты типоразмерного ряда судовых охладителей масла (табл. 7) имеют конструкцию с сегментными перегородками и подвижной трубной доской. Трубы в трубной решетке расположены с шагом 27 мм по равносоставленному треугольнику (рис.1,а). Пресная вода подается в трубное пространство, имеющее два хода.

Таблица 7

Данные конструкции судовых охладителей масла

№	Шифр аппарата	Высота, м	Длина, м	Диаметр корпуса внутренний, м	Масса, кг
1	20М.00017	0,359	1,256	0,25	176
2	20М.03.000	0,335	1,555	0,25	156
3	30М.000	0,564	0,875	0,375	230
4	40М.01.000	0,745	2,06	0,49	670
5	40М.000.04	0,745	2,34	0,49	1180

Аппараты с теплопроизводительностью аналогичной типоразмерному ряду судовых охладителей масла были рассчитаны с применением критериальных уравнений, полученных в [4] для интенсификатора "гофрированная лента с надрезами".

Конструкция теплообменников с применением ленточной вставки была изменена (рис.1,б). Вместо применяющихся в стандартных теплообменниках дорогостоящих оребренных труб были использованы стандартные бесшовные трубы диаметром 20x1 мм. Также было выполнено перераспределение сред: охлаждаемое масло было направлено по трубному пространству, а вода – по межтрубному. Это позволило значительно снизить числа Re в трубном пространстве для увеличения коэффициента теплопередачи и снижения требуемой поверхности теплообмена.

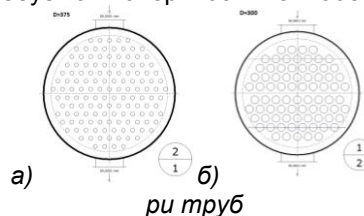


Рис.1. Расположение отверстий трубной доски маслоохладителя 30М.000 с оребренным пучком, масло снаружи труб, (а) и маслоохладителя аналогичной теплопроизводительности с гладким пучком (б), масло и интенсификатор внут

Расчет проводился в режиме перебора различных вариантов конструктивных параметров. При расчете изменялись следующие параметры:

диаметр кожуха от 250 мм до 800 мм, длина труб от 0,5 до 3 м и количество ходов трубного пространства от 1 до 4.

Рабочие параметры воды и масла – температура на входе, расход, теплосъем (оставались неизменными в расчетах с интенсификацией и без нее) и перепад давления по маслу задавались согласно табл. 8. Температуры на выходе определялись из расчета при фиксированных значениях тепловой нагрузки. Значения перепада давления по маслу ограничивались исходя из допустимых и все расчеты, превышающие их, автоматически отбрасывались.

Таблица 8

Параметры работы маслоохладителей на рабочих режимах

№	Шифр аппарата	Расход, м <sup>3</sup> /ч		Температура на входе, °С		Теплосъем, кВт	Перепад давления по маслу, кПа
		Вода	Масло	Вода	Масло		
1	20М.00017	30	28,5	70	85	59	120
2	20М.03.000	55,7	45	39	74	242	150
3	30М.000	65	30	38	75	200	60
4	40М.01.000	143	70	35	60	470	150
5	40М.000.04	85	85	54	74	517	82

Из диаграммы сравнения теплообменной площади аппаратов с применением исследованных в [4] лент типа "гофрированная с надрезами" (рис.2) видно, что нельзя однозначно выбрать наиболее эффективную конструкции турбулизаторов при унифицированных размерах судовых ТА.

В исследованных аппаратах наибольшее снижение теплообменной поверхности достигается с применением "гофрированной ленты с надрезами" с параметрами  $s/d=7$  и  $t/d=0,5$ . При этом данная лента обладает более низкой степенью теплогидравлической эффективности 1,41 по сравнению с другими лентами, эффективность которых достигает значений 1,6 (см.табл. 2). Это связано со степенью использования максимально допустимого давления по потоку масла – чем наиболее полно используются допустимые потери давления, тем эффективнее "работает" поверхность теплообмена. Важную роль также играет наличие большого допустимого перепада

давления в ТА, что дает большую вариативность в исследовании конструкций ТА.

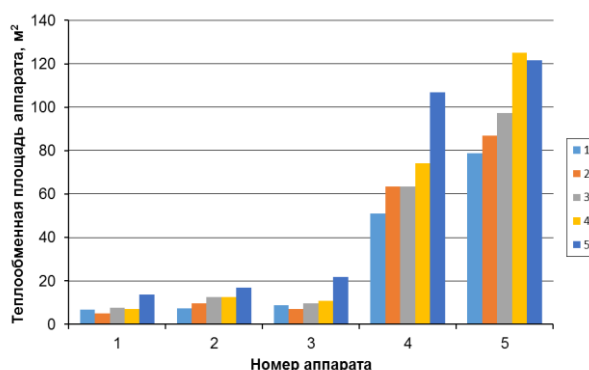


Рис.2. Площадь теплообмена типоразмерного ряда аппаратов с применением "гофрированной лентой с надрезами" – 1,2,3,4 (для образцов из [3]); 5 – для стандартных оребренных труб без интенсификаторов в трубе

Можно сделать вывод о том, что снижение общей площади поверхности определяется не только эффективностью ленточной вставки, но и конструкцией самого аппарата. Возможность перебора интенсификаторов с различными теплогидравлическими характеристиками в сочетании с типоразмерным рядом позволяет добиваться максимального снижения поверхности, а следовательно, создания более компактных теплообменников.

**Заключение**

Проведенный анализ особенностей конструкции и работы типоразмерного ряда судовых охладителей воды и масла показал возможность интенсификации теплообмена и необходимость повышения эффективности судовых охладителей путем применения ленточных интенсификаторов.

Выполненные расчеты типоразмерного ряда существующих ТА показали эффективность использования интенсификаторов типа "гофрированная лента с надрезами" и "профилированная лента с надрезами".

Авторы выражают признательность компаниям Н-Пром Бюро, HTRI и Нева-Теплотехника за поддержку в проведении данных исследований.

**Литература**

1. Жуков В.А., Ратнов А.Е. Модернизация системы охлаждения дизеля 8ЧН14/14 для его использования в составе судовой энергетической установки // Двигатели внутреннего сгорания. – 2012, №2. – С.59-64.
2. Manglik R.M. and Bergles A.E. Swirl Flow Heat Transfer and Pressure Drop with Twisted-Tape Inserts // Advances in Heat Transfer. – 2002. – Vol. 36. – P. 183-266.
3. Медведев В.В., Лакиза М.В. Интенсификация теплообмена в трубном пространстве и повышение надежности судовых теплообменных аппаратов // Судостроение. – 2015, №5. – С.40-42.
4. Лакиза М.В. Интенсификация теплообмена в трубном пространстве гофрированными ленточными вставками с надрезами // Морские интеллектуальные технологии. – 2017, №1(35). Т.1. – С.39-42.

**References**



1. Zhukov V.A., Ratnov A.E. Modernizatsiya sistemy okhlazhdeniya dizelya 8ChN14/14 dlya ego ispol'zovaniya v sostave sudovoy energeticheskoy ustanovki [Modernization of cooling system diesel engine made by Tut-aev motor plant for using in structure of shipping power mounting]. Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Internal combustion engines], 2012, N 2, pp.59-64. (In Russian)
2. Manglik R.M. and Bergles A.E. Swirl flow heat transfer and pressure drop with twisted-tape inserts, James P. Hartnett and Thomas F. Irvine, Eds., Advances in heat transfer, 2002, Vol. 36, Academic press Elsevier Science, pp.183-286.
3. Medvedev V.V., Lakiza M.V. Intensifikatsiya teploobmena v trubnom prostranstve i povyslenie nadezhnosti sudovykh teploobmennyykh apparatov [Intensification of heat exchange and improvement of reliability of shipboard heat exchangers]. Sudostroenie, 2015, N 5, pp. 40-42. (In Russian)
4. Lakiza M.V. Intensifikatsiya teploobmena v trubnom prostranstve gofirovannymi lentochnymi vstavkami s nadrezami [Heat transfer enhancement in tube side by corrugated twisted tape with cuts]. Morskie intelektual'nye tekhnologii [Marine Intelligent Technologies]. 2017, N 1(35), V1, pp.39-42. (In Russian)

**УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

УДК 629.7:519.622.852

**ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДВОДНОГО РОБОТА****Сиек Юрий Леонардович**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
e-mail: siek@mail.ru**Хуторная Екатерина Викторовна**

кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
e-mail: hutorianka@yandex.ru**Аннотация**

В работе предложено для проектирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) подводного робота (ПР) использовать понятие информационной модели, которое позволяет объединить в одном информационном пространстве различные методы разработки БИНС ПР. Проведен структурный анализ БИНС ПР с использованием информационной CASE-технологии. Для коллективной работы над проектированием БИНС ПР в системе управления жизненным циклом Windchill разработана методика работы над проектом.

Представлено математическое обеспечение БИНС ПР в средних широтах. Алгоритм использует уравнения Пуассона. Получены ошибки при определении параметров ориентации и навигации, что в дальнейшем ставит необходимым задачу корректировки предложенных алгоритмов.

Приведенное математическое обеспечение демонстрирует сложность вычислительных процедур при функционировании БИНС ПР. Ввиду этого предлагается в качестве вычислителя использовать высокопроизводительную вычислительную систему, обладающую возможностями реализации параллельных алгоритмов.

**Ключевые слова:** информационная модель, бесплатформенная инерциальная навигационная система, структурный анализ, управление жизненным циклом.

**INFORMATION MODEL OF STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM FOR UNDERWATER ROBOT****Siek Yuri Leonardovich**

the docent, Dr.Sci.Tech.,

the head of department of automatic control systems and onboard computers  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: siek@mail.ru**Khutornaia Ekaterina Viktorovna**

the Candidate of Technical Sciences,

the docent of department of automatic control systems and onboard computers  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: hutorianka@yandex.ru

## Abstract

The paper suggests to use the concept of information model for the design of strapdown inertial navigation system for underwater robot. This concept allows to combine various methods of strapdown inertial navigation system development in a common information space. The structural analysis of strapdown inertial navigation system for underwater robot with the help of CASE-technology is done. The technique for collaborative work under the project "Strapdown inertial navigation system of underwater robot" is designed by means of CALS-technologies.

The mathematical description for strapdown inertial navigation system of underwater robot in the middle latitudes is given. The algorithm uses the Poisson equations. The errors during the determination of orientation and navigation parameters are obtained. In future it is necessary to correct the proposed algorithm.

Presented mathematical description demonstrates the complexity of computational processes during the operation of strapdown inertial navigation system of underwater robot. Thus it is suggested to use a high-performance computing system with capabilities of parallel algorithms implementing as an onboard computer.

**Key words:** information model, strapdown inertial navigation system, structural analysis, lifecycle support.

## Введение

Основой навигационных комплексов современных ПР являются БИНС, которые представляют полную информацию о навигационных параметрах движения – углах курса, крена, дифферента, ускорения, скорости движения и координатах объекта. При этом БИНС почти автономны, так как практически не требуют внешней информации. Благодаря возможности определения углового положения объекта с высокой точностью в любом диапазоне углов и с высокой частотой выдачи информации, БИНС к настоящему времени не имеют альтернативы. Исследования в области развития БИНС направлены прежде всего на решение двух основных задач - на повышение надежности и точности этих систем, что ставит актуальным вопрос информационного обеспечения процесса проектирования таких систем. Традиционные подходы к построению БИНС ПР опираются на математическое моделирование системы и организацию бортовой вычислительной среды, решающей задачу обеспечения ресурсов для алгоритмов БИНС ПР. Понятие информационной модели позволяет комплексировать существующие подходы, тем самым делая возможным рациональное использование информационных технологий для повышения эффективности проектирования БИНС ПР. CASE-технологии (англ. Computer-Aided Software Engineering – общее название группы технологий, методов и средств проектирования программного обеспечения, поддерживаемых соответствующими средствами автоматизации этапов анализа, проектирования, разработки и сопровождения систем) базируются на различных концепциях, ключевой из которых является структурный анализ [4]. CALS-технологии (англ. Continuous Acquisition and Lifecycle Support – непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла) обеспечивают поддержку жизненного цикла исследуемой системы [2].

## 1. Анализ понятия информационной модели

Понятие информационной модели определено в ГОСТ 34.003-90. Информационная модель - модель объекта, представленная в виде информации, описывающей существенные для данного рассмотрения параметры и переменные величины объекта, связи между ними, входы и выходы объекта и позволяющая путем подачи на модель информации об изменениях входных величин моделировать возможные состояния объекта [1]. Выделяют следующие функции информационных моделей: описание структуры, накопление информации, организация удобного доступа к данным и документам, математическое обеспечение, визуализация данных, реализация вычислительной среды [6]. Методы реализации перечисленных функций рассмотрены в данной статье.

2. Информационная поддержка жизненного цикла и структурный анализ бесплатформенной инерциальной навигационной системы подводного робота

Для осуществления первой функции информационной модели проведен структурный анализ БИНС ПР. С его помощью проведена декомпозиция системы, принято решение о необходимости совершенствования структурных характеристик БИНС ПР, количественно оценены используемые ресурсы по критериям времени и стоимости [2]. На рис. 1 представлена диаграмма декомпозиции БИНС ПР, включающая в себя потоки работ, описывающие определение параметров ориентации. Цветом выделены перекрестки, отображающие последовательность протекания указанных работ при работе алгоритма определения параметров ориентации, и предложения по улучшению существующего алгоритма. На вход алгоритма поступают значения проекций вектора угловой скорости, на выходе получаем углы ориентации. Проведенный структурный анализ является начальным этапом в формировании алгоритмического обеспечения информационной модели

с использованием современной CASE-технологии.

Для реализации функций накопления информации и организации удобного доступа к данным выбрана система управления жизненным циклом Windchill. В ней разработан проект под названием «БИНС ПР» (дерево проекта представлено на рис. 2). К дереву проектирования для формирования оболочки информационно модели (единого информационного пространства) добавлены данные, содержащие в себе методы исследования БИНС ПР.

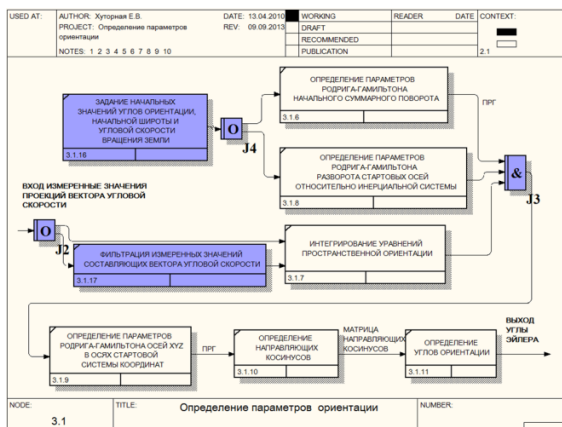


Рис.1. Диаграмма декомпозиции БИНС ПР, использующая нотацию потоков работ

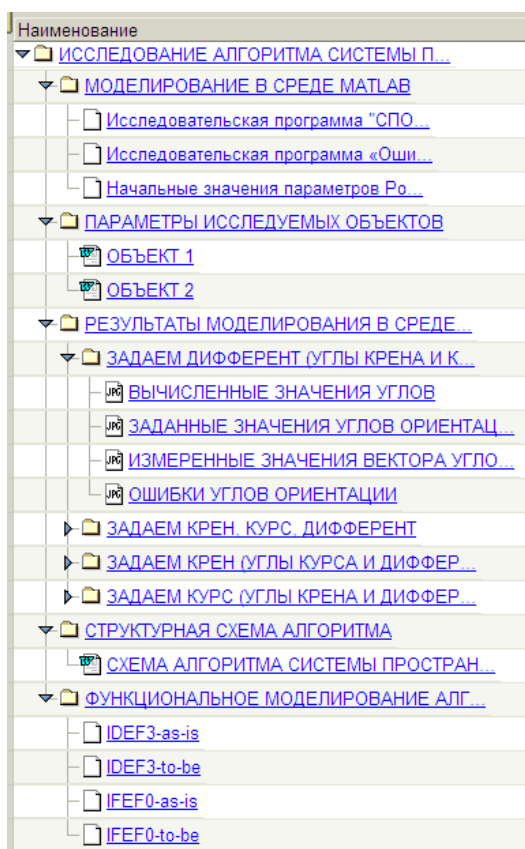


Рис.2. Дерево проекта «БИНС ПР»

Так как проектирование БИНС ПР относится к классу сложных технических задач, то целесооб-

разен коллективный подход. Для рационализации взаимодействия группы разно профильных разработчиков предложена методика коллективной работы над проектом, структура которой представлена на рис. 3. Методика разработана на основе логики, реализованной в применяемой CALS-технологии.

Предложенная методика в системе Windchill позволяет работать коллективу разработчиков в едином информационном пространстве, настроив организационную часть системы на выполнение отдельных видов работ, хранить данные о БИНС (включая изменения) и обеспечивать быстрый и удобный доступ к ним. Включает альтернативные варианты, использование которых сокращает срок и повышает качество разработки исследуемого объекта [6].

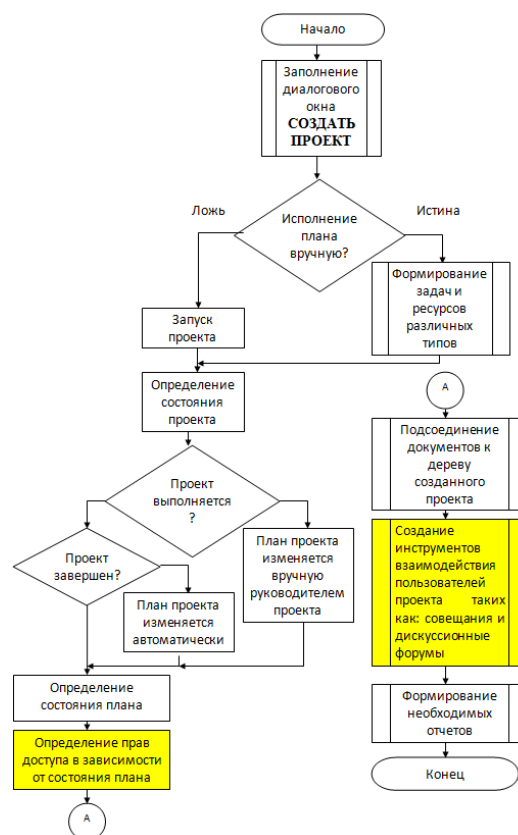


Рис.3. Блок-схема методики коллективной работы над проектом «БИНС ПР»

3. Математическое описание и моделирование бесплатформенной инерциальной навигационной системы подводного робота в средних широтах

Математическое описание информационной модели включает в себя разработанную модель БИНС ПР для случая средних широт, учитывающую скорость вращения Земли, геометрическую форму Земли, вектор кажущегося линейного ускорения, широту и долготу текущего местоположения подводного робота. Решение задачи рассматривается в следующих системах координат:  $O\xi\eta\zeta$  – стартовая географическая система

координат;  $O\xi_0\eta_0\zeta_0$  – геоцентрическая система координат;  $OXYZ$  – связанная с ПР система координат. Модель использует уравнения Пуассона, характеризующие поворот связанной системы координат относительно стартовой географической системы. Численное интегрирование мат-

ричного уравнения дает непосредственно матрицу направляющих косинусов, по которой определяются параметры ориентации. Модель учитывает ошибки измерений угловых скоростей и ускорений ПР.

Вектор состояния системы  $x$ , описывающий БИНС ПР, имеет вид:

$x = [b_{11} \ b_{12} \ b_{13} \ b_{21} \ b_{22} \ b_{23} \ b_{31} \ b_{32} \ b_{33} \ v_\xi \ v_\eta \ v_\zeta \ \eta \ \varphi \ \lambda_{мек}]^T$ . Где  $b_{11} - b_{33}$  – элементы матрицы направляющих косинусов  $B$ , которая характеризует системы координат  $OXYZ$  относительно системы координат  $O\xi\eta\zeta$ . Матрица  $B$  выглядит следующим образом:

$$B = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \cos \gamma \sin \theta & -\sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin \gamma \sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \cos \gamma & -\cos \theta \sin \gamma \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \gamma - \sin \psi \cos \gamma \sin \theta & \cos \psi \cos \gamma + \sin \psi \sin \gamma \sin \theta \end{bmatrix},$$

где  $\psi, \gamma, \theta$  – углы ориентации ПР – курс, крен, дифферент соответственно.  $v_\xi, v_\eta, v_\zeta$  – составляющие вектора линейной скорости ПР в стартовой географической системе координат.  $\xi, \eta, \zeta$  – координаты ПР.  $\varphi, \lambda_{мек}$  – широта и долгота ПР соответственно.

Тогда система дифференциальных уравнений, описывающая БИНС ПР, при заданных начальных условиях имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dB}{dt} &= B * \Omega, \\ \frac{dv_\xi}{dt} &= a_{kx} * b_{11} + a_{ky} * b_{12} + a_{kz} * b_{13} - v_\zeta (\omega_x * b_{21} + \omega_y * b_{32} + \omega_z * b_{23} + \omega_3 * \sin \varphi) + \\ &+ v_\eta (\omega_x * b_{31} + \omega_y * b_{32} + \omega_z * b_{33}), \\ \frac{dv_\eta}{dt} &= a_{kx} * b_{21} + a_{ky} * b_{22} + a_{kz} * b_{23} - v_\zeta (\omega_x * b_{11} + \omega_y * b_{12} + \omega_z * b_{13} + \omega_3 \cos \varphi) - \\ &- v_\xi (\omega_x * b_{31} + \omega_y * b_{32} + \omega_z * b_{33}) + g, \\ \frac{dv_\zeta}{dt} &= a_{kx} * b_{31} + a_{ky} * b_{32} + a_{kz} * b_{33} + v_\xi (\omega_x * b_{21} + \omega_y * b_{32} + \omega_z * b_{23} + \omega_3 * \sin \varphi) - \\ &- v_\eta (\omega_x * b_{11} + \omega_y * b_{12} + \omega_z * b_{13} + \omega_3 \cos \varphi), \\ \frac{d\eta}{dt} &= v_\eta, \\ \frac{d\varphi}{dt} &= \frac{v_\xi}{R}, \\ \frac{d\lambda_{мек}}{dt} &= \frac{v_\zeta}{R * \cos \varphi}. \end{aligned} \right.$$

Для вычисления матрицы направляющих косинусов  $B$  используется матричная форма, где:  $\Omega$  – кососимметричная матрица вида:

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix},$$

в которой  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – проекции относительной угловой скорости ПР  $\bar{\omega}$  в связанной системе координат OXYZ, значение которых определяются уравнением:  $\bar{\omega} = \bar{\omega}_a - u$ . Где  $\omega_{ax}, \omega_{ay}, \omega_{az}$  – проекции абсолютной угловой скорости ПР, которые измеряют датчики угловой скорости;  $u_x, u_y, u_z$  – проекции переносной угловой скорости ПР, которые получают на основании уравнений, представленных ниже:

$$\begin{cases} u_\xi = (\omega_3 + \dot{\lambda}_{мек}) * \cos \varphi, \\ u_\eta = (\omega_3 + \dot{\lambda}_{мек}) * \sin \varphi, \\ u_\zeta = -\dot{\varphi}. \end{cases}$$

$\omega_3$  – угловая скорость вращения Земли.

R – радиус Земли.

$a_{kx}, a_{ky}, a_{kz}$  – компоненты вектора кажущегося ускорения полюса ПР.

В зависимости от решаемой задачи, требуемой точности и размера охватываемой территории в качестве фигуры Земли используются ее различные модели: физическая поверхность, геоид, эллипсоид, сфера, плоскость. В статье рассматривается сферическая модель Земли и радиус принят равным 6371000 м [7].

Для расчета координат  $\xi, \eta, \zeta$  ПР в стартовой географической система координат используются следующие формулы:

$$\begin{aligned} \xi &= ((R+h_2) \cos \varphi_2 \cos \lambda_2 - \\ &- (R+h_0) \cos \varphi_0 \cos \lambda_1) \cos \lambda_1 + \\ &+ \sin \lambda_1 ((R+h_2) \cos \varphi_2 \sin \lambda_2 - \\ &- (R+h_0) \cos \varphi_0 \sin \lambda_1), \\ \eta &= -\cos \varphi_0 \sin \lambda_1 ((R+h_2) \cos \varphi_2 \cos \lambda_2 - \\ &- (R+h_0) \cos \varphi_0 \cos \lambda_1) + \\ &+ \cos \varphi_0 \cos \lambda_1 (\cos \varphi_2 \sin \lambda_2 (R+h_2) - \\ &- (R+h_0) \cos \varphi_0 \sin \lambda_1 + \\ &+ \sin \varphi_0 ((R+h_2) \sin \varphi_2 - (R+h_0) \sin \varphi_0), \\ \zeta &= \sin \varphi_0 \sin \lambda_1 ((R+h_2) \cos \varphi_2 \cos \lambda_2 - \\ &- (R+h_0) \cos \varphi_0 \cos \lambda_1) - \sin \varphi_0 \cos \lambda_1 * \\ &* ((R+h_2) \cos \varphi_2 \sin \lambda_2 - (R+h_0) \cos \varphi_0 \sin \lambda_1 + \\ &+ \cos \varphi_0 ((R+h_2) \sin \varphi_2 - (R+h_0) \sin \varphi_0), \end{aligned}$$

где  $\varphi_2 = \varphi$ ;  $\lambda_2 = \lambda_{мек}$ ;  $\varphi_1 = \varphi_0$ ;  $\lambda_1 = \lambda_0 + \omega_3 t$ ;  $\varphi_0, \lambda_0$  – начальные значения широты и долготы в стартовой географической системе координат;

$h_0, h_2$  – значение высоты в стартовой географической системе координат и текущее значение высоты соответственно.

Для реализации функции визуализации элементов информационной модели БИНС ПР по приведенному математическому обеспечению составлена модель в среде Matlab. На рис. 4 и 5 приведены ошибки при определении параметров ориентации и навигации.

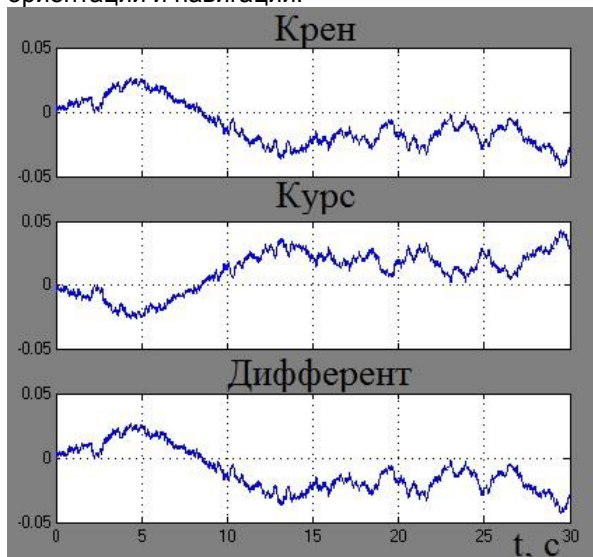


Рис.4. Ошибки при определении параметров ориентации (единицы измерения по оси y - градусы)

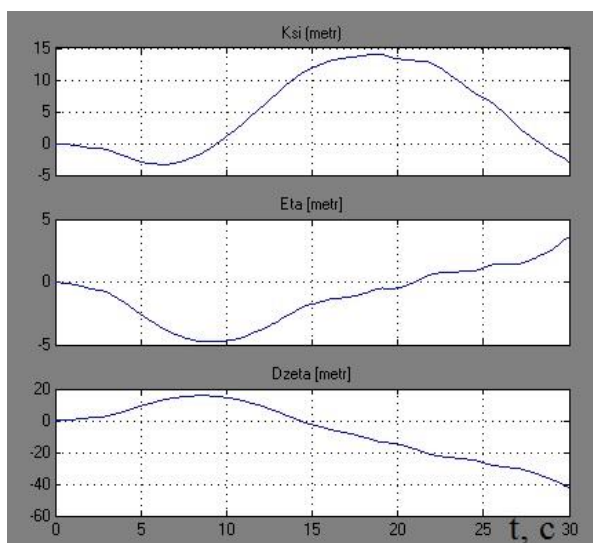


Рис.5. Ошибки при определении параметров навигации

Полученные графические результаты показывают необходимость корректировки приведенного математического описания БИНС ПР, что приведет к усложнению вычислительных процедур при реализации алгоритмов БИНС ПР в конкретном вычислителе. Поэтому для осуществления функции информационной модели, которая заключается в реализации вычислительной среды, предложена ее организация в виде высокопроизводительной вычислительной системы ПР, обеспечивающей

поддержку методов параллельного программирования с учетом сложности предполагаемого математического обеспечения.

**Заключение**

Таким образом, объединив все полученные результаты, с применением современных CASE и CALS-технологий сформирована информационная модель БИНС ПР, которая включает в себя использованные инструментальные средства, результаты структурного анализа БИНС ПР, раз-

работанное математическое и программное обеспечение и предложения организации бортовой вычислительной среды в виде высокопроизводительной вычислительной системы с возможностью реализации параллельных алгоритмов с требуемыми характеристиками. Информационная модель БИНС имеет вид (рис. 6):

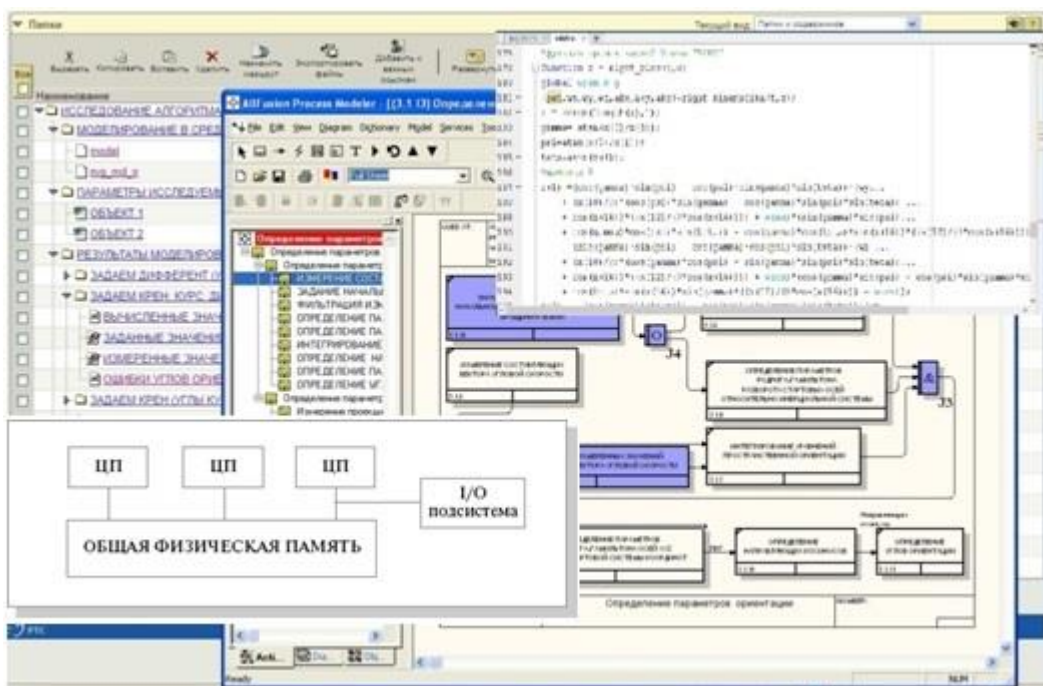


Рис.6. Информационная модель БИНС ПР

Представленная информационная модель упрощает разработку алгоритмического обеспе-

чения, решающего задачу бесплатформенной инерциальной навигации ПР.

### Дополнительная информация

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России №2.5464.2017/БЧ.

The results were obtained in the framework of the state task of the Ministry of Education of the Russian Federation number 2.5464.2017/Basic Tasks.

### Литература

1. ГОСТ 34.003-90 «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения» [Электронный ресурс] режим доступа: <http://gostexpert.ru/gost/gost-34.003-90>.
2. Жуков, Ю.И. Информационное обеспечение жизненного цикла морского подводного оружия: монография. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ., 2012 г.– 254 с.
3. Жуков, Ю.И., Сиек, Ю.Л., Хуторная, Е.В. Информационное моделирование пространственной ориентации и навигации подводных роботов, монография, СПб: изд-во СПбГМТУ, 2014 – 124 с.
4. Маклаков, С.В. BPwin ERwin CASE-средства разработки информационных систем. М: Диалог-МИФИ, 2001. – 304 с.
5. Марка Д.А., МакГоуэн К. SADT – методология структурного анализа и проектирования. М.: Метатеchnология, 1993.
6. Хуторная, Е.В. Информационная модель системы пространственной ориентации подводного робота// Морское подводное оружие. Морские подводные роботы: вопросы проектирования, конструирования и технологий: труды отраслевой научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. – СПб.: ОАО «Концерн» Морское подводное оружие – Гидроприбор», 2015. С. 61-68.
7. Хохлова, В.В. Необходимость учета сферичности Земли при первичной обработке гравиметрических данных// Геофизические методы исследования Земли и ее недр, 2016. С.139.

### References

1. GOST 34.003-90 "Informacionnaja tehnologija. Kompleks standartov na avtomatiziro-vannye sistemy. Avtomatizirovannye sistemy. Terminy i opredelenija" [Jelektronnyj resurs] rezhim dostupa: <http://gostexpert.ru/gost/gost-34.003-90>.
2. Zhukov, Ju.I. Informacionnoe obespechenie zhiznennogo cikla morskogo podvodnogo oruzhija: monografija. SPb., Izd-vo SPbGMTU., 2012 g. 254 p.
3. Zhukov, Ju.I., Siek, Ju.L., Hutornaja, E.V. Informacionnoe modelirovanie prostranstvennoj orientacii i navigacii podvodnyh robotov, monografija, SPb, izd-vo SPbGMTU, 2014, 124 p.
4. Maklakov, S.V. BPwin ERwin CASE-sredstva razrabotki informacionnyh sistem. M, Dialog-MIFI, 2001. 304 p.
5. Marka D.A., MakGoujen K. SADT – metodologija strukturnogo analiza i proektirovanija. M., Metatehnologija, 1993.
6. Hutornaja, E.V. Informacionnaja model' sistemy prostranstvennoj orientacii podvodnogo robota. Morskoe podvodnoe oruzhie. Morskie podvodnye roboty: voprosy proektirovanija, konstruirovaniija i tehnologij: trudy otraslevoj nauchno-tehnicheskoy konferencii molodyh uchenykh i specialistov. SPb.: ОАО «Концерн» Морское подводное оружие – Гидроприбор», 2015. pp. 61-68.
7. Hohlova, V.V. Neobhodimost' ucheta sferichnosti Zemli pri pervichnoj obrabotke gra-vimetriceskikh dannyh. Geofizicheskie metody issledovanija Zemli i ee neдр, 2016. P.139.



**УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

УДК 338.242

**АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕХАНИЗМОВ  
УПРАВЛЕНИЯ СУДОСТРОЕНИЕМ****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 Анна Вадимовна**

кандидат экономических наук,  
начальник бюро финансового контроля, планирования и анализа  
АО «Адмиралтейские верфи»  
190121, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 203  
e-mail: annaviv@yandex.ru

**Аннотация**

Судостроительная промышленность России намного опередила другие отрасли в создании предпосылок для реализации современной модели отраслевого управления. Среди них – систематизированный семидесятилетний опыт управленческих преобразований за 1946-й – 2016-й годы, теоретические изыскания, а главное – уникальный научный задел в области нормативных и методических инструментов. Таким образом, миссия отрасли логически разворачивается в непротиворечивую матрицу индикаторов, подходящих для основы отраслевого управления. Ключевым методологическим вопросом как в мезоэкономической теории, так и в прикладном аспекте остается двухкритериальный механизм мотивации, стимулирования и оценки качества менеджмента. Если целевая составляющая может быть заимствована из планового прошлого, то институциональную предстоит создать применительно к рыночному контексту и действующему законодательству РФ. В случае положительного результата становится возможным приступить к формированию мобилизационного режима современной системы отраслевого управления.

Ключевые слова: отрасль, результат производства, сопоставление результатов, стратегический анализ, судостроение.

**ANALYTICAL REVIEW OF GOVERNANCE  
ARRANGEMENT IN 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 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 several formerly obscure phenomena and trends in Russian shipbuilding managerial system, revealed due to innovative analytical implementation. Sustained growth conception is repudiated. The two-phased model (mobilization vs stagnation) is not only corroborated in principle, but received an exact quantitative evaluation. The soviet/russian shipbuilding industry market position was retraced down to 1946 in comparison with the characteristics of management system. Some management crises were discovered up to strategical level.

The new approach to corporation lifecycle periodization based on peculiar features of managerial practice was put forward and proved.

During the soviet period (1946-1990) each rising period coincided with the presence of two-contoured (not just hierarchical levels) managerial system, covered the mesoeconomy field. Both contours were tuned for different aims. Mission or upper contour – satisfaction of demand for ships institutional or lower contour – efficient usage of resources.

Most menacing consequences and industry descent was stirred by merging both contours during unlucky economic reform 1970-1980.

The worst peril for future industry progress – the forming of antisystem counterproductive bonds between the triade members – shipbuilder - benchmark – customer begotten by conjunction “monopoly-monopsony” was revealed and investigated.

Some quantitative information was inserted into long-range discussion about serial production in shipbuilding for better judgement on its virtues and faults.

Key words: analytical implement, industrial dynamics, industrial dynamics, product comparison, product evaluation, reflection, reflective analysis, shipbuilding branch, strategic management.

Вопрос о практической полезности описанного в нашей статье в № 4 (34) т. 1 2016 г. инструментария, как правило, формулируется в канонической форме: жили же 70 лет без использования продвинутых аналитических методов, авось и впредь обойдёмся...

Поэтому лучше начать обсуждение с откровенного и горького высказывания В. М. Пашина: «В развитии судостроения достигнут рубеж, когда мы даже не можем понять, в чем же, собственно, мы отстали?» (2012 г.). Уже было однозначно ясно, что причина отставания лежит в сфере управления, но «сверху» пробиться к ответу через «птичий язык» IT - терминологии судостроителю не удавалось, а «снизу», через осознание собственных потребностей мешала именно неосознанность таковых...

Наконец, уже в XXI веке, колоссальные средства, вложенные в развитие отрасли IT с интригующим названием «искусственный интеллект», вызвали появление на рынке массы продуктов, раскрывающих содержание понятия. Для судостроения наиболее актуальны такие составляющие, как:

- big data – хранилище больших массивов данных;
- deer mind – глубокое обучение (удачнее был бы перевод: глубокая память);
- программы многомерных расчётов.

При этом до создания единого программно-аппаратного комплекса для поддержки результативных решений в динамичной, неустойчивой среде на основе заведомо неполный, нечеткой и не имеющий полной доказательной базы информации всё ещё не близко. Однако, её элементы локально используются судостроительными корпорациями Юго-Восточной Азии (ЮВА), обеспечивая им решающие конкурентные преимущества на мировом рынке. Именно созданию таких частных баз и программно - алгоритмических комплексов посвящен весь дискурс наших исследований.

Практическое применение результатов начинается с «глубокого обучения», т. е. формирования памяти, охватывающий временной отрезок протяженностью 70 лет и выявления проблем, не воспринимавшихся еще в явном виде, а тем более в количественном выражении. Для чистоты

анализа приходится разделить полученный хронология на 2 отрезка – СССР (1946 – 1990-е годы, 45 лет) и РФ (1991 – 2016г., 25 лет). Причина этого – не столько объём журнальной статьи, сколько стремление сохранить однородность исходных данных в каждом из массивов – единства социально-экономической формации (плановая и рыночная экономика), размер государства и состав отрасли, структура и функции органов государственного управления.

Советский период характеризуется автаркией, что выгодно отличает его, как объект анализа, от российского. Наше судостроение было ограждено от внешних влияний (кризисы, конъюнктура рынков, действия конкурентов и так далее). Плановая система по идее обеспечивает равномерную неполную загрузку мощностей, следовательно, все причины возможных изменений имеют внутрисудостроительный, либо даже внутриотраслевой характер и, следовательно, сравнительно легко идентифицируется. Тем не менее, когда перед современными руководителями отечественного судостроения, которые, как правило, приходит извне отрасли и меняются через полтора – три года, уже при взгляде на генеральный график динамики результатов деятельности отрасли возникает ряд проблемных вопросов:

- чем объяснить появление перепадов объёмов судостроения, почти не уступающих по глубине провалов с аналогичными явлениями на мировом рынке, хотя и не совпадающих с ними по времени;
- почему пики результатов 1953г. и 1973г. совпадают по величине (1145 – 1058 тыс. сgt), после чего следует падение;
- какова роль массивованных инвестиций, если они не привели к увеличению результата;
- как позиционируется отечественное судостроение на фоне развития мирового.

Поиск ответа на эти вопросы логично начать с периодизации развития отрасли, причём в качестве критерия отнесения к тому или иному периоду в первом приближении достаточно использовать наличие прогрессивного либо регрессивного тренда результатов. Из восьми периодов два (А и В) демонстрируют повышательную тенденцию, два (Б и Д) - понижательную, а период (Г) - стаг-

национную, правда, на максимуме эффективно-сти. На период подъема приходится 17 лет, спада - 19 лет; если всего за 45 лет мы произвели 33847 тыс. сgt, то прямые потери, могущие быть поставлены в вину руководителям периода спада составили 4537 тыс. сgt/ecgt (14,6%), а недобор из-за медленного восстановления (упущенные возможности) – 6388тыс. сgt/ecgt (18, 9 %) - итого 33,5%. Потери трети объёма судостроения при массовых заказах транспортных судов за рубежом – многовато для плановой экономики!

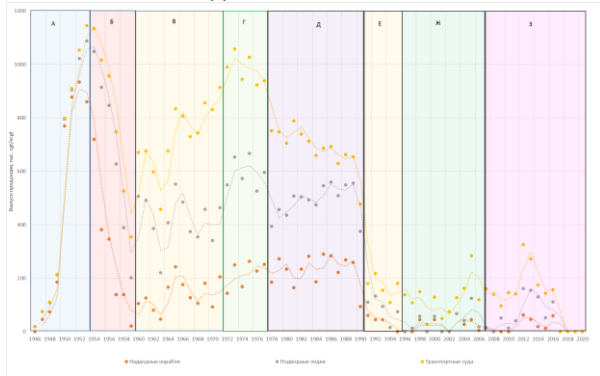


Рис. 1. Динамика судостроения СССР/РФ.

Первое условие объективности анализа – полная совокупность исторических фактов – налицо, но лишь в части главного из них – результата судостроительного производства, вне контекста. А несравненно более трудную задачу – создание системы, способной к контекстному распознаванию ситуации США планируют решить лишь в текущем 2017-м году на базе платформы Nigel. Снова пришлось решить задачу упрощенным способом – формализовать характеристики контекста стратегического управления судостроением в виде набора девяти темплетов, отражающих последовательность эволюции каждого из принимаемых к учёту факторов.

1	Факт этностики	Политическая	Идеологическая	Национальная	Индустриальная	Морская	Технологическая	Генетическая	Религиозная
2	Параллельные термины стратегического управления	Планирование	Позиционирование	Ресурсы	Дипломатическая	Трансформационная			
3	Макроэкономические приоритеты	Агрария	Социал интеграция	Либерализация	Глобализация	Политэкономия			
4	Внеэкономические дилеммы	МСИИ	МСИС	Разрыв в ресурсах	Линейный эффект	Катастрофа	Противоположность		
5	Субъекты стратегического управления	ВКС/МСП	ГЭС/создатели	Новые МСП	Перестройка России	МПОСК			
6	Организационные возможности	Массовое производство	Дифференциация	Верфи 66-70 гг.	АСУ	Навигация	Детализация		
7	Технологические ориентиры	Организационно-технологическое единство	Продукция	Материальная автоматизация	Тех. перевооружение	Стальность			
8	Ресурсы политики	Восстановление мощностей 1	Стабильность	Эффективность 2	Расширение	Коммерциализация			
9	Конверсия	Управленческая	Межотраслевая	Систем ориент	Виртуальная	Переход собственности	Рынок	Монополистическая	

Рис. 2. Темплеты контекста стратегического управления судостроением.

Проще всего анализировать периоды подъема, отличающиеся мобилизационным характером. На первый взгляд могло показаться, что успех периодов (А) и (В) мог быть гарантирован полным совпадением темплетов. Действительно, налицо если не совпадающие, то непротиворечивые военно- стратегические доктрины, экстенсив-

ное развитие производственной базы, макроэкономические приоритеты. Но различий – больше. Достаточно сказать, что на этапе (А) существовал централизованный орган отраслевого управления – МСП; на этапе (В) оно было упразднено, а верфи были рассыпаны по территориальным органам – совнархозам. Тем не менее, кризис управления не наступил, скорее наоборот.

Кризиса удалось избежать, благодаря возникновению двухконтурного механизма управления, сущность и закономерности которого поныне не привлекают внимание отраслевой науки.

На этапе (А) управление по главному, целевому контуру осуществлял единоличный руководитель – И.В.Сталин. Миссию отрасли он сформулировал так: «Мне не интересны ваши рубли, мне нужны ваши корабли!»! В любой самой тоталитарной экономике невозможно обойтись без технико-экономического планирования, ресурсообеспечения, финансирования и так далее. Этим и занимались органы второго контура: отраслевые министерства, общесоюзные ведомства экономического блока и так далее; но благополучие руководителей всех уровней определялось выполнением судостроительной программы. Именно на этапе А был достигнут максимальный выпуск продукции 1145 тыс. сgt/ecgt и самый быстрый темп его роста (на 250 тыс. сgt/ecgt ежегодно).

Первый кризис управления наступил в 1955 - 58-м годах. Со смертью И.В. Сталина, то есть «естественной» ликвидацией целевого контура управления, отраслевое министерство вкпе с главным заказчиком (ВМФ) проявило полную некомпетентность в целеполагании и межотраслевой кооперации. Наиболее болезненно переживалось противоречие научно-технического характера: наши великие министры - А.А. Горегляд, В.А.Малышев, реформировав организационно - технологическую сторону производства, ставили рекорды выпуска заведомо устаревшей продукции. Провал протекал под сенью бесконечных реорганизаций, «министерской чехарды», надежд на переход от мобилизационной фазы к стабильной и увенчался уникальным результатом – недогрузкой верфей. При огромном потенциальном портфеле заказов, естественно, такое министерство ставило рубли выше кораблей, и его ликвидация почти не вызвала огорчений.

Этап В начался нестандартно, с воссоздания целевого контура управления. Он был учреждён в своеобразной и весьма эффективной форме военно-промышленной комиссии при СМ СССР. (1957 – 63г.г. – Д.Ф. Устинов, а с 1963 г. – Л.И. Смирнов). В неё входили ответственные работники ЦК и Совета Министров, Министры оборонных отраслей, Главкомы видов вооруженных сил, эксперты из ученых и конструкторов. Комиссия занималась всеми научно техническими проблемами создания и производства вооружения и военной техники, межотраслевой кооперации, сроками, но - не деньгами. Её ни в коей мере не волновали объём валовой продукции и тому подобные ТЭП; она не интересовалась ценами, фи-

нансированием, распределением ресурсов. Несмотря на постоянно расширяющийся круг задач и явное снижение административного ресурса ВПК успешно справлялась с функцией верхнего контура управления благодаря чётким формулировкам как миссии отрасли, так и основной цели – достижения стратегического паритета. Под эгидой ВПК вместо упраздненных министерств были созданы государственные комитеты, в подчинении которых были все отраслевые НИИ и КБ и лишь немногие отдельные заводы. Председатель ГКС, а затем Министр Б.Е.Бутома сконцентрировал внимание на научно-техническом прогрессе, в чем комитет и преуспел: за этап В был создан тот научно-технический задел, на котором отрасль держится до сих пор. Из 16 кораблей первого – второго рангов, сданных ВМФ за пятилетие 2012-й – 2016 годы (400,5 тыс. cgt/ecgt ) 88,1 % построены по проектам советского времени, в том числе 48,9% из них были спроектированы на этапах В и Г. Во взаимоотношениях с верфями организации Госкомитета не были связаны общей заботой о выполнении плана по валовой (чистой, нормативно - чистой продукции и другим показателям), выраженных финансовыми измерителями. Поэтому они жёстко контролировали нормативную базу и производственные мощности заводов. На этом этапе объём выпуска продукции устойчиво рос, достигнув второго годового максимума – 1058 тыс. cgt/ecgt в год. Применение предложенного инструментария позволило выявить и исследовать принципиальные различия между двухконтурными механизмами управления этапов (А) и (В). Первый был унаследован отраслью от полностью отработанный на протяжении 1930-го – 1945 годов системы управления экономикой в мобилизационной фазе и успешно использовался далее без каких-либо реформаций. Производство росло, себестоимость и цены продукции снижались, финансовая система была здоровой, инфляция отсутствовала. Полномочия и ответственность контуров были отрегулированы и сбалансированы исходя из приоритета верхнего (целевого, миссионного). Исчезновение такового привело систему управления отраслью в хаос. Механизм этапа (В) пришлось создавать заново и в него был сознательно заложен инновационный приём – создание диалектического противоречия между контурами – верхним (ВПК) и нижним (совнархозы), при создании между ними «ничейной зоны» путём ликвидации административного органа – отраслевого министерства. Предприятие при таком подходе становилось объектом действия двух противоположных векторов, но сомкнуться в антисистемном альянсе они не могли.

Тем временем на этапе (Г) обозначились три фактора, отчётливо предвещавшие системный кризис:

- «острое несоответствие между механизмами управления и фундаментальными целями общества»;

- снижение уровня внешней угрозы вследствие достижения стратегического паритета в МСЯС, заключением договора ОСВ – 1 (1972г.), приведшее к потере чётко измеряемой цели и когерентных с ней индикаторов;
- ускорение процессов виртуализации финансов и управления экономикой: знаковым событием которого стало соглашение в Кингстоне (Ямайка) 1976 - 78 гг. о юридической демонетизации золота и замене золотовалютного стандарта стандартом SDR – специальных прав заимствования;
- реинкарнация отраслевых министерств (1965г.), объясненная стремлением снизить нагрузку на верхний контур, а на деле облегчившее создание неясных структур – триад, планирующий орган-заказчик – производство, отработавших методы наращивания виртуальных показателей при снижении реального выпуска продукции.
- наконец, доктрина «хозяйственной реформы» Е.Г. Либермана – А.Н. Косыгина, сводившейся к копированию, точнее, имитации атрибутов западной экономики, которая привела к дисбалансу контуров управления, постановке ложных целей и ложных критериев их достижения.

Следствием этого на этапе Д стал устойчивый тренд к падению производства. Годовой выпуск продукции равномерно падал с 1027 тыс. cgt/ecgt (1975 г.) до 654 тыс. cgt/ecgt (1989 г.). В результате «реформы» отрасль не произвела 3510 тыс. cgt/ecgt, что и подвело советское судостроение к грани перестроечной катастрофы.

Применение инструмента компенсации тоннажа позволило вскрыть тщательно скрываемый реформаторами парадокс. Проведённая, казалось бы, в интересах наиболее рыночного сектора – гражданского судостроения – реформа наиболее тяжело сказались именно на нём. Годовой объём производства транспортных судов на этапе (Д) упал с 398 тыс. cgt/ecgt до 99 тыс. cgt/ecgt (в 4 раза), в то время как по боевому кораблестроению - лишь в 1,2 раза. Из 3510 тыс. cgt/ecgt «потерянного» выпуска продукции 2360 тыс. cgt/ecgt пришлось именно на долю гражданского судостроения, несмотря на неограниченный размер доступного портфеля заказов.

Установлено и доказано, что случайное совпадение пиковых значений объёма выпуска 1145 тыс. cgt/ecgt (1954 г.) и 1088 тыс cgt/ecgt (1974 г.) не свидетельствуют о наличии какой-то естественной границы возможностей отрасли, но, напротив, говорит об извечном стремлении русских промышленников в стабильной фазе копить ресурсы, не заботясь о лучшем использовании резервов. В известной мере эта тенденция может быть преодолена выводом целей эффективности использования потенциала на верхний контур управления.

Гордое представление о процветании советского судостроения в период плановой экономики не очень тускнеет, даже если наше позиционирование рассматривать не в статике, а на фоне непрерывной конкурентной гонки в мировом судостроении. (Рис. 3).

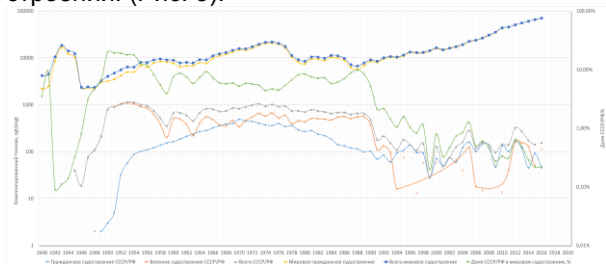


Рис. 3. Позиционирование судостроения СССР/РФ

В 1950-м году мировое судостроение произвело 4,25 млн. cgt/ecgt, в том числе советское – 1,145 млн. cgt/ecgt (23,5 %). Абсолютный рекорд за три столетия существования российского судостроения был достигнут на фоне резкого (в 4,4 раза) послевоенного падения зарубежного судостроения и бурного подъема нашего. В предперестроечном для СССР и кризисном для запада 1988-м году наша доля в мировом судостроении (6,6 млн. cgt/ecgt) удержалась на уровне 10,6 % который был достигнут уже на пике 1960 – х г.г. Держаться на третьем месте среди великих судостроительных держав – неплохой результат для континентальной страны. Тогда далёкой перспективой показались бы современные 0,3 %. На вопрос о безрезультативности больших инвестиций в экстенсивное развитие производственных мощностей и интенсивное техническое перевооружение (с точки зрения их влияния на реальный выпуск продукции) бытует множество ответов. Самый радикальный и неоспоримый – а никак!

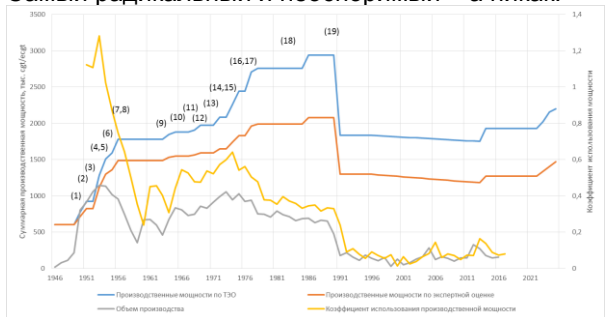


Рис. 4. Производственные мощности СССР/РФ

Его подкрепляют мнения, что ни один инвестиционный проект не окупился и даже не вышел на заявленную мощность. Называют диспропорции между числом наличных рабочих и рабочих мест, неумение организовать производственный процесс и управлять им, конструктивно- технологические ошибки, а главное – мощь экономического противодействия росту объема производства, встроенного в действующий механизм

управления. Единственно рациональное суждение о пользе инвестиций в новые основные производственные фонды: на них мы можем строить нужные сегодня суда, которых не смогли бы на старых построечных местах. И всё же следует сначала научиться работать, а потом - инвестировать. От лучшего достигнутого в этапе Д времени коэффициента использования производственных мощностей весьма 0,54 (1975 г.) и тем более в 1989 г. (0,22) весьма далеко до желаемого 0,7 – 0,8.

И, наконец, последняя тема анализа: как ключевой фактор ее жизненного цикла - серийность продукции. В отрасли живёт «двойкодышащая мантра»: серийность мешает всем и всегда. Кажется бы, в начале 1950 годов в эпоху триумфального внедрения «танковых методов» массового производства все хвалили огромные серии: эсминцы проекта 30–бис – 80 единиц; СКР проекта 50 -68 единиц, подводные лодки проекта 613 – 215 единиц. Конструкция, технология, организация отрабатывались на первых кораблях серии до автоматизма.

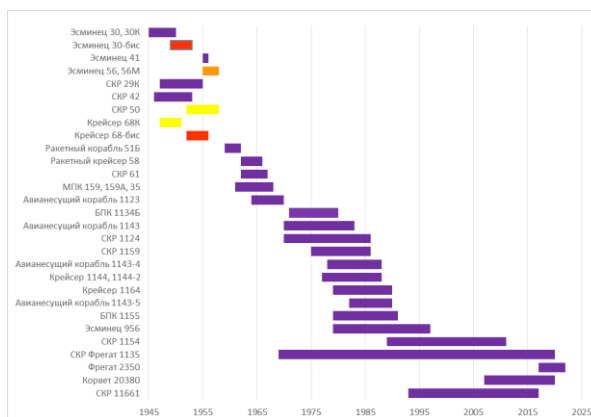


Рис. 5. Серийность постройки надводных кораблей

Но как только «жизнь» серий удлинилась по сравнению с тремя – пятью годами до 10 и более лет, мантра зазвучала наоборот – длинные серии убивают службы технической подготовки производства, вместо эволюционного развития техники каждый новый проект – скачок в неизвестность. Идут ссылки на опыт Юго-Восточной Азии, где видите ли, серии по 10 – 20 единиц. Но там длинная серия должна укладываться в двухлетний срок и готовиться до начала постройки, а не в её процессе. Длинная серия – бонус за полноценную подготовку производства и короткий цикл. В утешение любителям этой мантры можно добавить: сейчас мы на грани нового мирового рекорда: серии СКР (фрегатов) 1135 (во всех модификациях). количество – 53 единицы; в постройке – 50 лет (1970 – 2020 г.г.) это уже на грани дедовской и прадедовской технологии.

### Заключение

Применение разработанного инструментария к анализу процессов и явлений, происходивших в судостроении СССР/РФ принесло результаты, отличающиеся существенной научной новизной и практической значимостью.

1. Дезавуировано ложное представление о равномерном тренде монотонного возрастания выпуска продукции в плановой экономике; выявлены и введены в научный оборот понятия о противоположных тенденциях и управленческих кризисах в неконкурентной централизованной системе.

2. Предложена и обоснована периодизация развития отрасли в плановый период.

3. Совокупность факторов, составляющих контекст управления отрасли сведена в 9 темплетов, позволяющих не только выявить причины прогрессивных либо регрессивных тенденций в ретроспективе, но и служить к разработке будущих стратегий.

4. Установлено, что резкое возрастание результата деятельности отрасли обусловлено применением двухконтурного механизма. Верхней (целевой) контур – по критерию осуществления миссии, нижний (институциональный) – по критерию выполнения плановых результатов, выраженных экономическими показателями.

5. Самые опасные антисистемные явления, вызывавшие кризисы управления, были обусловлены неэффективными хозяйственными и административными реформами.

6. Вскрыта и изучена самая опасная угроза будущему отрасли – возникновения в условиях ситуации «монопсония – монополия» внутрисистемных контрпродуктивных связей в звеньях «целеполагание – заказчик – подрядчик».

7. На протяжении исследуемого периода не удалось создать механизм управления эффективностью использования наличных ресурсов; вследствие этого положительный эффект инвестиций оказывался крайне незначительным.

8. Внесена количественная определённость в долговременную дискуссию о серийности и освоённости продукции как основополагающего элемента и жизненного цикла.

**Литература**

1. Логачев С.И., Чугунов В.В., Горин Е.А. Мировое судостроение: современное состояние и перспективы развития. – СПб., МорВест, 2009.
2. Судостроительная промышленность России; отраслевое исследование. М.: INFO Line, 2015.
3. "Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2020 года и на дальнейшую перспективу" (утв. Приказом Минпромэнерго РФ от 06.09.2007 N 354).
4. Федеральная целевая программа "Развитие гражданской морской техники на 2009 - 2016 годы" (утв. Постановлением Правительства РФ от 21.02.2008 N 103 (ред. от 19.12.2015)).

**References**

1. Logachev S.I., Chugunov V.V., Gorin E.A. Mirovye sudostroenie: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya. – SPb., Morvest, 2009.
2. Sudostroitel'naya promishlennost' Rossii: otraslevoye issledovanie. M.: INFO Line, 2015.
3. «Strategiya razvitiya sudostroitel'noy promishlennosti na period do 2020 goda i na dalneyshuyu perspektivu» (utv. Priказom Minpromenergo RF ot 06.09.2007 № 354).
4. Federal'naya tselevaya programma "Razvitiye grazhdanskoy morskoy tekhniki na 2009-2016 gody (utv. Postanovleniem Pravitel'stva RF ot 21.02.2008 № 103 (red. ot 19.12.2015)).

**ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ**

УДК 621.224 (043)

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ В СОВМЕСТНОМ МЕТОДЕ КОНЕЧНЫХ И ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ ДЛЯ ГИДРОМАШИН И НЕКОТОРЫМИ АНАЛИТИЧЕСКИМИ ПРИБЛИЖЕНИЯМИ****Золотаревич Валерий Павлович**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры информационно-навигационных систем,  
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики  
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49  
e-mail: zolotarevich@yandex.ru

**Никущенко Дмитрий Владимирович**

доктор технических наук, доцент  
проректор по научной работе,  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

**Салиенко Александр Евгеньевич**

заместитель директора бизнес-единицы по ГТО – директор по науке и исследованиям,  
Акционерное общество «Тяжмаш»  
446010, г. Сызрань, ул. Гидротурбинная, д.13

**Фрумен Александр Исаакович**

кандидат технических наук, профессор  
ученый секретарь совета Санкт-Петербургского государственного морского технического университета,  
профессор кафедры строительной механики корабля,  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

**Югов Николай Васильевич**

доктор технических наук, профессор  
начальник отдела информационных, цифровых и компьютерных инженерных технологий,  
ООО «ТГР Инжиниринг»  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10/14

**Аннотация**

В работе представлены сравнения численных результатов расчетов на основе разработанных авторами физико-математических моделей и алгоритмов, с моделями, имеющими точные аналитические решения, а также с имеющимся экспериментальными данными для гидромашин.

Для моделей упругих тел: бесконечный цилиндр и мембрана в жестком экроне точное решение представлено в виде бесконечного ряда для акустических характеристик излучения. Приведенные аналитические решения сравнивались с численными решениями характеристик излучения, полученными совместным методом конечных и граничных элементов. Графический материал иллюстрирует хорошее совпадение результатов численных и аналитических решений для различных видов возбуждения.

Разработанный аппарат был также применен для сравнения численных и экспериментальных параметров собственных колебаний для различных типов лопастных гидромашин. Результаты расчетов для рабочего колеса радиально-осевой турбины и лопасти рабочего колеса поворотно-лопастной турбины показали хорошее совпадение с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** Рабочее колесо, радиально-осевая гидротурбина, поворотно-лопастная гидротурбина, собственные частоты и формы, метод конечных элементов, метод граничных элементов, вибрации, резонансная частота.



# COMPARATIVE ANALYSIS OF NUMERICAL SOLUTIONS TO THE COUPLED BOUNDARY AND FINITE ELEMENTS METHOD WITH EXPERIMENTAL DATA FOR HYDRAULIC MACHINES AND SOME OF THE ANALYTICAL APPROXIMATIONS

**Valerii P. Zolotarevich**

PhD, Department of Information and Navigation Systems,  
ITMO UNIVERSITY (SAINT PETERSBURG NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY OF INFORMATION  
TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS)  
49 Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russia  
e-mail: zolotarevich@yandex.ru

**Dmitriy V. Nikushchenko**

Associate professor, , Dr. Sci. Tech.,  
Pro-rector for Research,  
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation

**Alexandr E. Salienco**

Research and Development Director,  
JSC "TYAZHMASH"  
13 Hydroturbinnaya St., Syzran, Samara region, Russia, 446010

**Alexandr I. Frumen**

Professor, PhD  
Department of structural mechanics of ships,  
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation

**Nicolay V. Yugov**

Professor, Dr. Sci. Tech.,  
head of Department of information, digital and computer engineering technology,  
LLC "TGR-Engineering"  
Lotsmanskaya, 10/14, St. Petersburg 190008, Russian Federation

## Abstract

The paper presents comparison of numerical results of calculations based on the developed by the authors of physico-mathematical models and algorithms, with models that have exact analytical solutions and with experimental data for hydraulic machines.

For models of elastic bodies: the infinite cylinder and the membrane in a rigid screen, the exact solution is presented in the form of an infinite series for the acoustic characteristics of the radiation. The analytical solutions were compared with numerical solutions of the radiation characteristics obtained by the coupled method of finite and boundary elements method. Graphic material shows good coincidence of results of numerical and analytical solutions for different types of excitation.

The developed methods also used for comparison of numerical and experimental parameters of natural vibrations for different types of vane hydraulic machines. The results of calculations for runner Francis turbine and the blade of the runner Kaplan turbine showed good agreement with the experimental data.

**Key words:** Francis turbine, Kaplan turbine, natural frequencies and mode shapes, finite element method, boundary element method, vibration, resonance frequency.

## Введение

Разработанный в [1,2] метод численного анализа нуждается в проверке путем тестирования на задачах, решения для которых известны. Первым шагом такой проверки является сравнение численных и аналитических решений для излучателей, имеющих точные решения во всей области звуковых частот. Ниже приведены результаты численного моделирования в сравнении с аналитическими данными для бесконечного ци-

линдра (плоская задача), для пульсирующей сферы и для круговой мембраны в жестком экране. Отметим, что аналитическое решение для характеристик излучения круговой мембраны в акустической среде получено впервые. Полученное аналитическое решение для импеданса жидкости при излучении бесконечного цилиндра, совпадает с решением, представленным в работе [3].

Также разработанный метод применялся для расчета собственных частот рабочих колес гидротурбин двух типов: радиально-осевой и поворотно-лопастной. Полученные численные результаты сравнивались с имеющимися экспериментальными данными.

**1. Излучение бесконечной круговой цилиндрической оболочки**

В случае кругового бесконечного цилиндра, погруженного в среду, можно получить аналитическое решение для механического сопротивления структуры (плоская задача). Для колебательной скорости в любой точке цилиндра может быть записано следующее соотношение:

$$V(\varphi) = \sum_{n=0}^m V_n \cos n\varphi. (1)$$

$$\Theta_n(ka) = \left| \frac{J_n(ka) - iY_n(ka)}{J'_n(ka) - iY'_n(ka)} \right| \cos \left( \arctg \left( -\frac{J_n(ka)}{Y_n(ka)} \right) - \arctg \left( -\frac{J'_n(ka)}{Y'_n(ka)} \right) \right), (4)$$

$$X_n(ka) = \left| \frac{J_n(ka) - iY_n(ka)}{J'_n(ka) - iY'_n(ka)} \right| \sin \left( \arctg \left( -\frac{J_n(ka)}{Y_n(ka)} \right) - \arctg \left( -\frac{J'_n(ka)}{Y'_n(ka)} \right) \right), (5)$$

где  $J_n(ka)$ ,  $Y_n(ka)$  и  $J'_n(ka)$ ,  $Y'_n(ka)$  — функции Бесселя и Неймана и их производные соответственно.

$$Z_{ns} = 2i \frac{h}{a} \frac{\rho_s E}{1 - \nu^2} \left[ 1 + \frac{n^4 h^2}{3a^2} + \frac{n^2 (1 + (1/3)n^2 (h/a)^2)^2}{\omega^2 a^2 \rho_s \frac{1 - \nu^2}{E} - n^2 (1 + (1/3)n^2 (h/a)^2)} \right], (6)$$

где  $h$  — полутолщина оболочки;  $\rho_s$  — плотность материала оболочки;  $E$  — модуль Юнга;  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Полное механическое сопротивление системы «структура-жидкость» для  $n$ -й моды колебаний определяется как

$$Z_n = Z_{nf} + Z_{ns}. (7)$$

Колебательная скорость для  $n$ -й моды определится из соотношения:

$$V_n = \frac{F_n}{Z_n}. (8)$$

Здесь  $F_n$  — составляющая силы для  $n$ -й моды, действующий на цилиндр:

$$F(\varphi) = \sum_{n=0}^m F_n \cos n\varphi. (9)$$

После определения коэффициентов разложения колебательной скорости (см. формулу (1)) коэффициенты разложения давления (см. формулу (2)) определяются по формуле  $P_n = Z_{nf} V_n$ .

Все приведенные в данном разделе соотношения позволяют определять акустические параметры погруженного цилиндра при произвольном нагружении.

В качестве контрольного примера была выбрана цилиндрическая оболочка со следующими параметрами: радиус  $a = 3$  м; толщина  $2h = 0.11857$  м; материал оболочки с модулем

Аналогичное соотношение можно записать для давления:

$$P(\varphi) = \sum_{n=0}^m P_n \cos n\varphi. (2)$$

Здесь  $\varphi$  — цилиндрическая координата;  $n$  — номер моды колебаний. Из уравнения Гельмгольца для входного импеданса жидкости, соответствующего  $n$ -й моде в работе [4] получено следующее выражение:

$$Z_{nf} = \frac{P_n}{V_n} = c\rho(\Theta_n(ka) + iX_n(ka)). (3)$$

Здесь  $c$  — скорость звука;  $k$  — волновое число;  $a$  — радиус цилиндра;  $\rho$  — плотность жидкости;  $\Theta_n(ka)$  и  $X_n(ka)$  определяются по следующим формулам:

Механический импеданс для  $n$ -й моды для структуры определяется по формуле [21]:

Юнга  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>, коэффициентом Пуассона  $\nu = 0.3$  и плотностью  $\rho_s = 5180$  кг/м<sup>3</sup>. Оболочка полностью погружена в безграничную жидкость (вода с плотностью  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, со скоростью звука  $c = 1524$  м/с). Модель состоит из 48 конечных элементов двумерной балки, моделирующих цилиндрическую оболочку и имеющих три степени свободы в каждом узле (по оси X, по оси Y и поворот относительно оси цилиндра Z).

В процессе работы анализировалось три варианта возбуждения структуры (см. рис. 1):

- 1)  $n = 0$ ,  $F(\varphi) = F_0$  — рис. 1а;
  - 2)  $n = 1$ ,  $F(\varphi) = F_0 \cos \varphi$  — рис. 1б;
  - 3)  $n = 0, 1, 2, \dots, 11$ ,  $F(\varphi) = F_0 \sum_{n=0}^{11} \cos n\varphi$  — рис. 1в,
- где полагалось  $F_0 = 10$  Н.

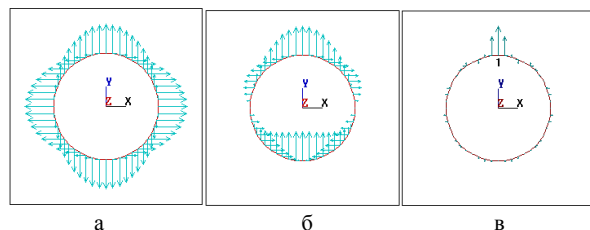


Рис. 1. Схема нагружения бесконечного цилиндра

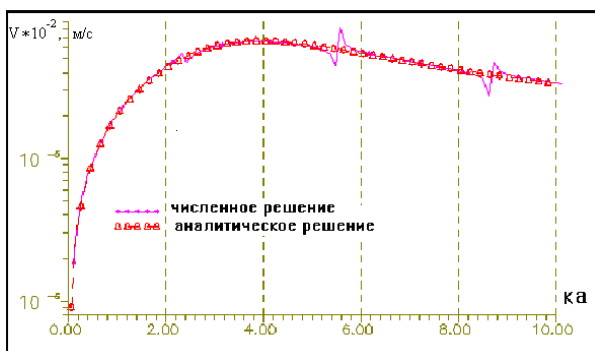


Рис. 2. Амплитуда колебательной скорости на поверхности цилиндра при возбуждении по схеме рис. 1а ( $n = 0$  — монополь)

На рис. 2 представлен график колебательной скорости на смоченной поверхности для нагружения цилиндра по схеме рис. 2.1а ( $n=0$  – монополь). На этом рисунке кривая, полученная путем численного расчета, приведена совместно с аналитическими результатами. Из рисунка 2.2 видно, что за исключением двух частот 470 и 672 Гц, существует хорошее совпадение аналитического и численного решения. Причины отклонения от точного решения на этих двух частотах обусловлены наличием характеристических частот (сингулярность решения).

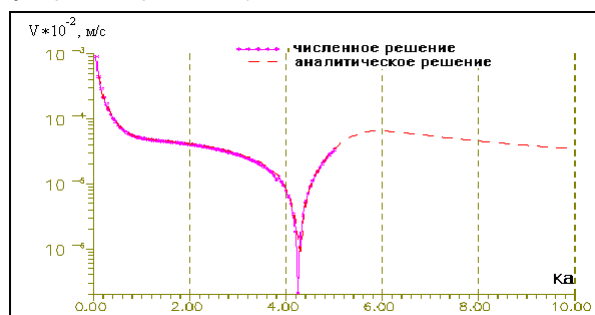


Рис. 3. Амплитуда колебательной скорости на поверхности цилиндра при возбуждении по схеме рис. 1б ( $n = 1$ )

На рис. 3 приведены графики амплитуд колебательной скорости в точке 1 (вверху цилиндра). Эти результаты соответствуют варианту возбуждения по схеме рис. 1б ( $n=1$ ). Антирезонанс на рис. 3 при значении  $ka = 4.25$  соответствует значению кольцевой частоты, на которой имеются только касательные перемещения и отсутствуют радиальные. Это обусловлено тем, что схема нагружения (рис. 1б) имеет не чисто дипольный характер.

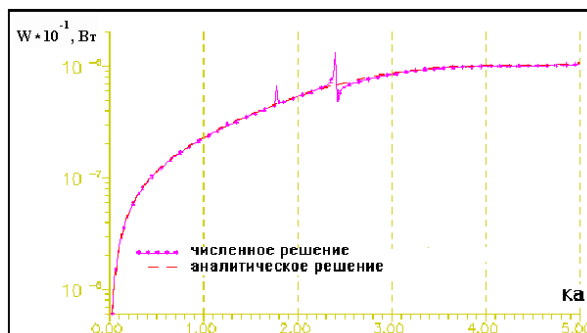


Рис. 4. Мощность звукоизлучения цилиндра при произвольном возбуждении по схеме рис. 1.в

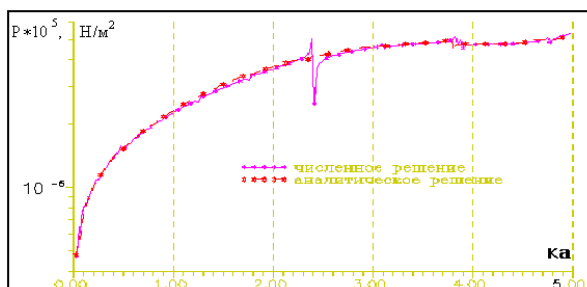


Рис. 5. Давление на расстоянии 50 м от точки 1 цилиндра по направлению оси Y при произвольном возбуждении по схеме рис. 1в

На рис. 4 и 5 представлены результаты расчета соответственно мощности звукоизлучения и звукового давления на расстоянии 50 м от точки 1 при нагружении бесконечного цилиндра по схеме на рис. 1в.

Приведенные результаты устанавливают полное совпадение численных и аналитических решений различных характеристик звукоизлучения бесконечного цилиндра при различных видах возбуждения. Отклонения численных решений от аналитических наблюдаются на характеристических частотах (сингулярность решения). Эти отклонения устранены применением специальных алгоритмов.

## 2. Излучение пульсирующей сферы

Рассмотрим звукоизлучение пульсирующей сферической оболочки, находящейся под гармоническим воздействием внутреннего равномерного давления. Решение для такого случая возбуждения зависит только от радиальной координаты.

Сначала рассмотрим колебания «сухой» структуры. Механическое сопротивление сферы определяется как:

$$Z_s = \frac{i}{\omega} (\omega^2 m_s - k_s), \quad (10)$$

где  $k_s = \frac{8\pi E h}{1-\nu}$ , а  $m_s = 4\pi a^2 h \rho_s$  — масса оболочки радиуса  $a$  и толщины  $h$ .

Для окружающей жидкости, механическое сопротивление запишется как

$$Z_l = i\omega\rho \frac{4\pi a^3}{1+ika}. \quad (11)$$

Для гармонически нагруженной давлением  $p_0$  сферической оболочки колебательная скорость на поверхности выражается через суммарный импеданс, как  $V = \frac{4\pi a^2 p_0}{Z_s + Z_f}$ . Давление, в свою

очередь, может быть записано через выражение для механического сопротивления жидкости:

$$p = \frac{Z_f V}{4\pi a^2}$$

Сравнение аналитических результатов с численным решением выполнено для сферы со следующими параметрами:  $a = 5$  м,  $h = 0.15$  м,  $\nu = 0.3$ ,  $\rho_s = 7600$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $c = 1524$  м/с,  $p_0 = 1$  Н/м<sup>2</sup>.

Конечно-элементная модель 1/8 части сферы приведена на рис. 6, а результаты сравнения численного и аналитического решений на рис. 7 (численное решение 2 – решение без подавления сингулярности на характеристических частотах; численное решение 1 – решение с подавлением сингулярности на характеристических частотах).

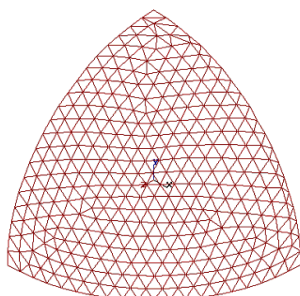


Рис. 6. Конечно-элементная модель пульсирующей сферы (1/8 часть)

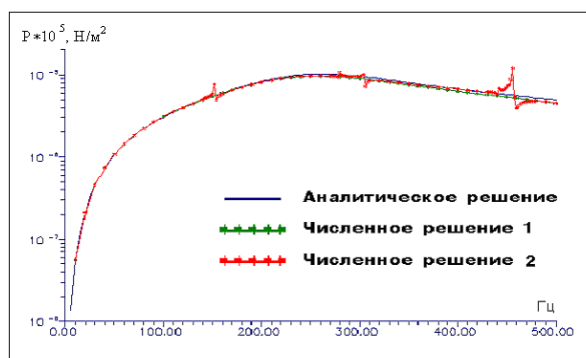


Рис. 7. Звуковое давление на пульсирующей сфере

В табл. 1 приведены значения давлений на поверхности сферы и на расстоянии 50 м от поверхности, определенные, в том числе, и на характеристической частоте ( $ka = 3.14$ ) с подавлением сингулярности.

Табл. 1 и рис. 7 демонстрируют прекрасное совпадение результатов численных и аналитических решений для различных характеристик излучения пульсирующей сферы. При этом различие в значениях звукового давления численного и аналитического решений на поверхности сферы не превышает 1.4 %, в значениях колебательной скорости на поверхности сферы – 1.1 %, в значении давления на расстоянии 100м – 0,5 %.

Таблица 1

Сравнение численного и аналитического решения для пульсирующей сферы

ka	Давление на поверхности (Н/м <sup>2</sup> ) x10 <sup>-1</sup>			Скорости (м/с) на поверхности x10 <sup>-7</sup>			Давление в 100 м (Н/м <sup>2</sup> ) x10 <sup>-2</sup>		
	числ.	анал.	погр.	числ.	анал.	погр.	числ.	анал.	погр.
0.5	0.3013	0.3032	0.6%	0.4402	0.4447	1%	0.1438	0.1444	0.4%
1.0	1.0146	1.022	0.7%	0.9381	0.9478	1%	0.4847	0.4865	0.4%
1.5	1.9033	1.918	0.8%	1.4966	1.512	1%	0.9099	0.9133	0.4%
2.0	2.8946	2.290	0.9%	2.1195	2.142	1%	1.3851	1.3903	0.4%
2.5	3.9951	4.034	1%	2.8211	2.851	1.1%	1.9133	1.9212	0.4%
2.8	4.7164	4.766	1%	3.2858	3.321	1.1%	2.2597	2.2696	0.4%
3.0	5.2241	5.281	1.1%	3.6143	3.653	1.1%	2.5034	2.5149	0.5%
3.1	5.4853	5.547	1.1%	3.7837	3.824	1%	2.6287	2.6412	0.5%
3.14	5.5911	5.654	1.1%	3.8524	3.893	1.1%	2.6795	2.6923	0.4%
3.2	5.7506	5.816	1.1%	3.956	3.998	1.1%	2.7560	2.7694	0.5%
3.3	6.0234	6.093	1.1%	4.1333	4.177	1.1%	2.8868	2.9013	0.5%
3.5	6.5734	6.651	1.2%	4.491	4.539	1.1%	3.1503	3.1672	0.5%
4.0	7.9477	8.047	1.2%	5.3864	5.442	1%	3.8096	3.8318	0.5%
4.5	9.1442	9.265	1.3%	6.166	6.228	1%	4.3886	4.4121	0.5%
5.0	9.8750	10.02	1.4%	6.6399	6.703	1%	4.7488	4.7699	0.4%

**3. Излучение круговой мембраны в жестком экране**

Рассмотрим простейший случай колебаний круговой мембраны, когда поверхность ее прогибов симметрична относительно центра круга. В этом случае прогибы  $z$  зависят только от расстояния по радиусу  $r$ , а граничным условиям можно удовлетворить с помощью следующего ряда:

$$z = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos b_n r, \quad (12)$$

где  $A_n$  — коэффициенты ряда, а  $b_n = \frac{(2n-1)\pi}{2a}$ .

Используя подход, изложенный в [5], запишем условие динамического равновесия системы в виде

$$\frac{\partial(\Delta U_{\max} - T_{\max} - D)}{\partial A_n} = 0. \quad (13)$$

Здесь

$$\Delta U_{\max} = \frac{1}{2} S \int_0^a \left( \frac{\partial z}{\partial r} \right)^2 2\pi r dr; \quad (14)$$

$$C_{ij} = 4\pi \left( \frac{S b_i b_j}{2} \int_0^a \sin(b_i r) \sin(b_j r) r dr - \frac{\rho_s \omega^2}{2g} \int_0^a \cos(b_i r) \cos(b_j r) r dr \right). \quad (18)$$

Далее учтем влияние акустической среды на колебания круговой мембраны. Рассмотрим случай, когда мембрана одной стороной контактирует с акустической средой. Тогда условие равновесия будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\partial(\Delta U_{\max} - T_{\max} - D - B)}{\partial A_n} = 0, \quad (19)$$

где  $B$  — средняя (за период колебаний) работа акустического давления  $P$  на перемещениях поверхности мембраны:

$$B = \pi \int_0^a P(r) z r dr, \quad (20)$$

Давление  $P(r)$ , удовлетворяющее уравнению Гельмгольца, может быть выражено через коэффициенты  $A_n$ :

$$P(r) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \psi_n(r), \quad (21)$$

где

$$\psi_n(r) = -\rho \omega^2 \int_0^a \frac{\exp(-ik|r-r'|)}{|r-r'|} r' \cos(b_n r') dr'. \quad (22)$$

На основании (21) с учетом (18) выражение (17) может быть представлено как

$$[C]\{A\} - [B]\{A\} = \{E\}, \quad (23)$$

где

$$B_{ij} = -\frac{\pi}{2} \int_0^a [\cos(b_i r) \psi_j(r) + \psi_i(r) \cos(b_j r)] r dr. \quad (24)$$

На основании вышеприведенных выражений для мембраны с параметрами  $a = 0.61$  м,

$$T_{\max} = \frac{\rho_s \omega^2}{2g} \int_0^a z^2 2\pi r dr; \quad (15)$$

$$D = \frac{1}{2} \int_0^a F_0 z 2\pi r dr. \quad (16)$$

В формулах (14)-(16) приняты следующие обозначения:  $\Delta U_{\max}$  — максимальное приращение потенциальной энергии;  $T_{\max}$  — максимальная кинетическая энергия;  $D$  — средняя (за период колебаний) работа внешней гармонической силы амплитуды  $F_0$ ;  $\rho_s$  — плотность мембраны на единицу поверхности;  $a$  — радиус;  $S$  — растягивающее усилие на единицу поверхности.

Нетрудно заметить, что выражение (13) после подстановки в него (12) приводит к системе уравнений относительно неизвестных  $A_n$ . В случае приложения единичной силы в центре мембраны система уравнений равновесия переписывается как

$$[C]\{A\} = \{E\}, \quad (17)$$

где  $\{A\}$  — вектор неизвестных коэффициентов;  $\{E\}$  — единичный вектор. Коэффициенты  $C_{ij}$  определяются из соотношения

$\rho_s = 7700$  кг/м<sup>3</sup> и  $S=5 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup> были получены аналитическое и численное решения для вибрации и звукоизлучения круговой мембраны в диапазоне частот от 0 до 500 Гц в воде. В табл. 2. приведены значения собственных частот колебаний мембраны в воде. На рис. 8 и 9 приведены частотные зависимости давления и скорости в центре мембраны (при излучении в воду).

Таблица 2  
Собственные частоты (Гц) мембраны в воде

№	Аналитическое решение	Численное решение	Погрешность, %
1	19	19	0
2	70	69	1.0
3	129	127	2.0
4	191	189	2.0
5	255	253	0.8
6	320	320	0
7	386	388	0.5

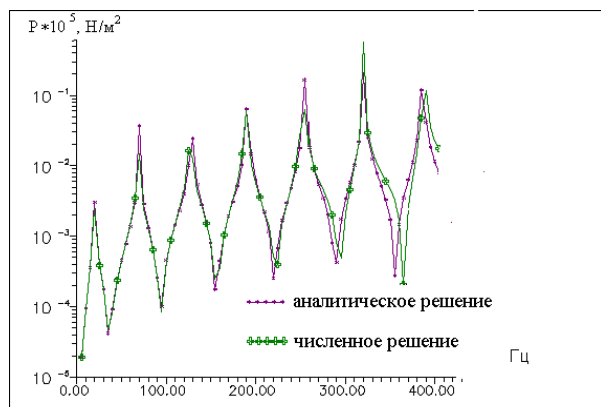


Рис. 8. Давление в центре мембраны

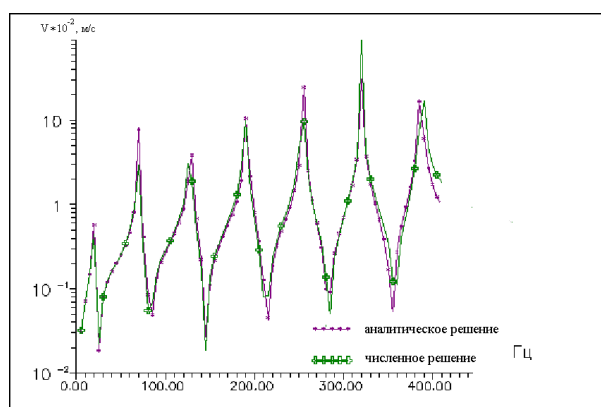


Рис. 9. Колебательная скорость в центре мембраны

Сравнение численных и аналитических результатов расчета звукоизлучения круговой мембраны показывает их хорошее совпадение по собственным частотам, спектрам давления и скорости на поверхности. Погрешность определения давлений и скоростей не превышает 1-2 процентов.

**4. Расчет собственных частот и форм колебаний рабочего колеса радиально-осевой турбины**

Разработанный аппарат был использован для исследования собственных частот и форм колебаний радиально-осевой гидротурбины. В отличие от работ [6,7] моделируется полное рабочее колесо. Геометрия рабочего колеса турбины показана на рис. 10.

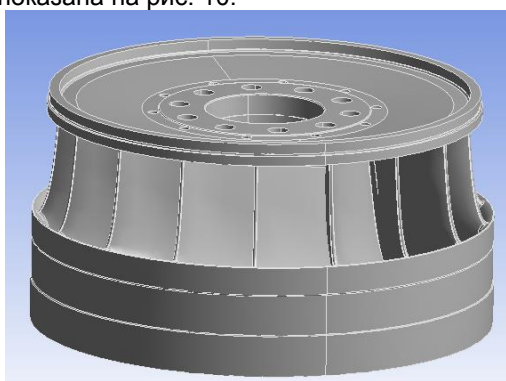


Рис. 10. Геометрия рабочего колеса радиально-осевой турбины

Таблица 3

Результаты расчета собственных (Гц) частот рабочего колеса радиально-осевой турбины

№	Воздух	Вода	Описание
1	131.8	112.3	Маятниковые колебания колеса $m=1$ (парные)
2	133.5	126.9	Первый тон колебаний лопастей
3	142.2	114.6	Колебания обода колеса по моде $m=2$ (парные)
4	232.9	162.7	Колебания обода колеса по моде $m=3$ (парные)
5	301.7	205.9	Второй тон колебаний лопастей
6	316.1	181.1	Колебания обода колеса по моде $m=4$ (парные)

В табл. 3 приведены результаты расчетов собственных частот рабочего колеса, а в табл. 4 приведены частот возмущающих сил, действующих на рабочее колесо.

Таблица 4

Частоты возмущающих сил, действующих на рабочее колесо радиально-осевой турбины

Частота возмущения, Гц	Описание
106.25 Гц, 53.12 Гц	Первая оборотно-лопастная частота и ее субчастота
112.5 Гц	Вторая оборотно-лопастная частота
125 Гц, 62.5 Гц	Первая оборотно-лопаточная частота и ее субчастота
250 Гц	Вторая оборотно-лопаточная частота

Из сравнения данных табл. 3 и 4 видно, что собственная частота первого тона лопасти 126.9 Гц и критично близка к первой оборотно-лопаточной частоте возбуждения 125 Гц. Кроме этого, вторая оборотно-лопастная частота попадает в область собственных частот маятниковых колебаний колеса по моде  $m=1$  (112.3 Гц) и в область собственных колебаний колеса совместно с лопастями по моде  $m=2$  (114.6 Гц). Следует также учитывать, что если первые тона возмущающих сил попадают в область первых тонов собственных колебаний лопасти, то это оказывает также существенное воздействие на колебания лопасти на втором тоне собственных частот колебаний (205.9 Гц). Такое критическое комплексное воздействие оборотных сил определяет разрушение колеса, а значит и требует совершенно другой величины запаса прочности. Другими словами конструкция колеса, обороты, число лопаток направляющего аппарата, число лопастей и диаметр колеса подлежат конструктивной переработке с целью обеспечения характеристик прочности, поскольку силовые воздействия вихрей большого масштаба от оборотных сил являются энергетически наиболее значимыми по сравнению с вихрями значительно меньшего масштаба от воздействия вихрей Кармана. На данной стадии можно сказать, что это усугубляет и без того критичную ситуацию в проблеме прочности турбины и ведет к разрушению и отрыву лопастей от ступицы.

Для сравнения результатов расчета использовались экспериментальные данные, получен-

ные в результате измерений спектра радиальных перемещений верхнего подшипника турбины (рис. 11).

Из рис. 11 видно, что максимальные значения радиальных перемещений наблюдаются на частотах 6.25 Гц и 12.5 Гц, которые соответствуют оборотной частоте рабочего колеса. Также имеются максимумы амплитуды перемещений в районе 50 Гц, 60 Гц, 112-114 Гц и 125 Гц. Спектральные составляющие до 100 Гц с большой вероятностью относятся к колебаниям вала совместно с присоединенным по механической связи генератором. Частота 125 Гц критично близка к значению собственной частоты первого (126.9 Гц) тона лопасти. А частоты 112-115 Гц попадают в область маятниковых клеваний колеса по моде  $m = 1$  и собственных колебаний колеса по моде  $m = 2$ . Можно объяснить, что всплески амплитуды перемещений обусловлены этими резонансными частотами, т. к. на этих частотах имеются возмущающие силы, обусловленные воздействием оборотных сил.

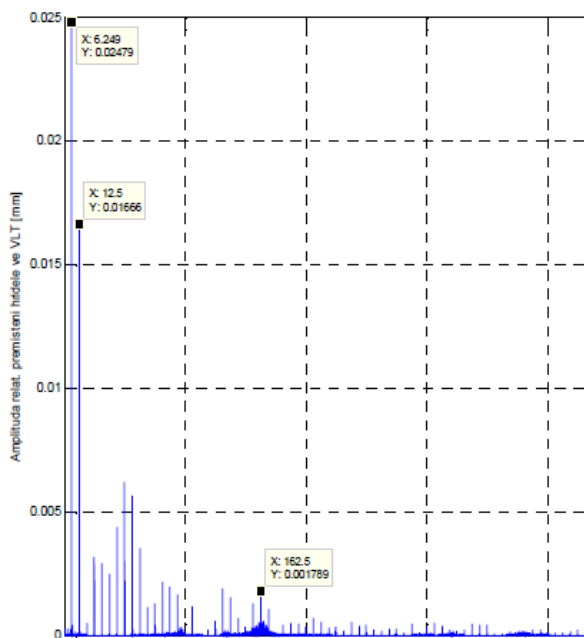


Рис. 11. Зависимость амплитуды радиальных перемещений подшипника рабочего колеса

**5. Расчет собственных частот и форм колебаний лопасти рабочего колеса поворотно-лопастной турбины**

Для лопасти рабочего колеса поворотно-лопастной турбины экспериментальные значения первых трех собственных частот приведены в табл. 5. Данные расчета и эксперимента даны относительно приведенной частоты вращения вала турбины.

Таблица 5

**Экспериментальные значения собственных частот лопасти поворотно-лопастной турбины**

	Частота 1	Частота 2	Частота 3
Воздух	29.9	38.8	61.8
Вода	12.1	23.7	41.2

Для расчета собственных частот сухой конструкции была использована сетка из элементов HEX8 и HEX20, в которой число элементов по толщине лопасти равно 6. Сеточное разбиение для HEX8 состояло из 29715 узлов и 24354 элементов. Сетка лопасти рабочего колеса показана на рис. 12. Значения базиса собственных частот и векторов для HEX8 и HEX20 практически не различались.

Для расчетов собственных частот лопасти в воде использовалось сеточное разбиение смоченной поверхности, узлы которого совпадали с соответствующими узлами сеточного разбиения лопасти на объемные элементы. В качестве базиса для расчета собственных частот лопасти в воде использовались первые 50 форм колебаний сухой конструкции. На рис. 13-15 приведены первые шесть собственных форм колебаний лопасти.

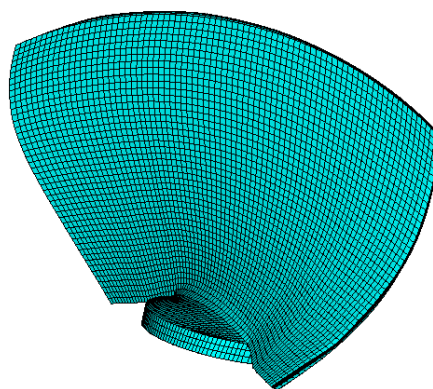


Рис. 12. Конечно-элементная сетка лопасти рабочего колеса турбины

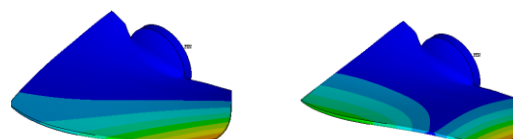


Рис. 13. Первая(слева) и вторая (справа) форма колебаний лопасти

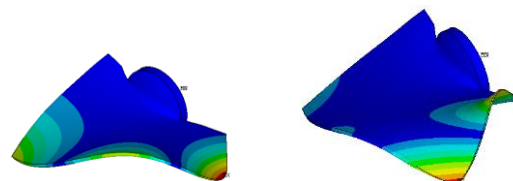


Рис. 14. Третья (слева) и четвертая (справа) форма колебаний лопасти

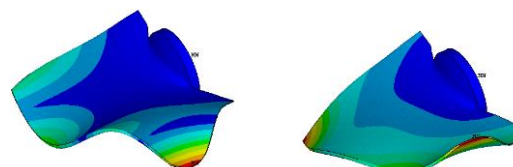


Рис. 15. Пятая (слева) и шестая (справа) форма колебаний лопасти

При расчетах использовались следующие механические характеристики лопасти и воды:  
 Модуль Юнга 2.05e11 Па  
 Плотность лопасти 7850 кг/м<sup>3</sup>

Коэффициент Пуассона 0.3  
 Скорость звука в воде 1450 м/с  
 Плотность воды 1000 кг/м<sup>3</sup>

Результаты расчетов для первых 5 собственных частот приведены в табл. 6. В скобках указаны экспериментальные значения.

Как видно из табл. 6, для 2 и 3 формы колебаний наблюдается хорошее совпадение с экспериментальными данными. Отличие от эксперимента значений собственных частот для первой формы колебаний требуют дополнительных исследований условий проведения эксперимента (электронные схемы, погрешности датчиков и преусилителей, а также типы применяемых вибраторов или виброизмерительных молотков). В противном случае расчет, как это часто случается, дает более точные результаты. Нельзя также исключать и систематические ошибки измерительного тракта.

Таблица 6

Результаты расчета собственных частот и форм колебаний лопасти рабочего колеса

№	В «воздухе», $\times f_0$	В «воде», $\times f_0$
1	26.9 (29.9)	15.9 (12.1)
2	39.0 (38.8)	25.7 (23.7)
3	61.3 (61.8)	42.2 (41.2)
4	76.8	51.1
5	92.0	67.2
6	98.6	88.1
7	124.4	95.2
8	144.8	106.7
9	140.4	110.6
10	158.7	120.8

**Заключение**

Итак, для проверки работоспособности программного комплекса был произведен расчетный анализ следующих излучателей: 1 - бесконечный цилиндр; 2 - пульсирующая сфера; 3 - круговая мембрана в жестком экране. Для первых двух излучателей точные аналитические решения представляют собой разложения в ряды по сферическим и цилиндрическим функциям для специфических видов возбуждения; решение для круговой мембраны в акустической среде получено самостоятельно методом Ритца. Сравнение расчетных и аналитических результатов показало их хорошее совпадение.

На примере расчета звукоизлучения сферы показаны возможности, созданного специального аппарата подавления погрешности на характеристических частотах [8].

Результаты расчетов для рабочего колеса радиально-осевой турбины и лопасти рабочего колеса поворотной лопастью турбины показали хорошее совпадение с экспериментальными данными.



### Литература

1. Золотаревич В.П., Салиенко А.Е., Фрумен А.И., Югов Н.В. Применение совместного метода конечных и граничных элементов в прямой импедансной постановке к исследованию резонансных характеристик инженерных конструкций. Морские интеллектуальные технологии, №2(36), Санкт-Петербург, 2017.
2. Золотаревич В.П., Салиенко А.Е., Фрумен А.И., Югов Н.В. Характерные особенности применения совместного метода конечных и граничных элементов к исследованию резонансных характеристик лопастных гидромашин. Морские интеллектуальные технологии, №2(36), Санкт-Петербург, 2017.
3. Гутин Л.Я. Избранные труды. Л.: Судостроение, 1977. 599 с.
4. Miguel C.Junger. Radiation Loading of Cylindrical and Spherical Surfaces. J.Acoustic Soc.America, 1952.Vol. 24. N3. P. 288-289.
5. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.
6. Золотаревич В.П., Салиенко А.Е., Фрумен А.И., Югов Н.В. Исследование собственных частот и форм колебаний лопасти рабочего колеса радиально-осевой гидротурбины на основе применения совместного метода конечных и граничных элементов. Морские интеллектуальные технологии, №2(32), Санкт-Петербург, 2016.
7. Золотаревич В.П., Салиенко А.Е., Фрумен А.И., Югов Н.В. Использование совместного метода конечных и граничных характеристик для анализа резонансных частот рабочего колеса гидротурбины. Морские интеллектуальные технологии., №2(32), Санкт-Петербург, 2016.
8. С. М. Piaszczyk, J. M. Klosner, "Acoustic radiation from vibrating surfaces at characteristic frequencies", Journal Acoustic. Soc. Am. 75, 363-372, 1984.

### References

1. Zolotarevich V.P., Salienco A.E., Frumen A.I., Yugov N.V. Primenenie sovmestnogo metoda konechnykh i granichnykh elementov v pryamoy impedansnoy postanovke k issledovaniyu rezonansnykh kharakteristik inzhenernykh konstruktсий. Morskіe intellektual'nye tekhnologii (Use of the copled finite and boundary elements method in direct impedance formulation to the study of the resonant characteristics of engineering constructions, Marine intelligent technologies) №2(36), Saint Petersburg, 2017.
2. Zolotarevich V.P., Salienco A.E., Frumen A.I., Yugov N.V. Kharakternye osobennosti primeneniya sovmestnogo metoda konechnykh i granichnykh elementov k issledovaniyu rezonansnykh kharakteristik lopastnykh gidromashin. Morskіe intellektual'nye tekhnologii (Characteristic features using of the coupled boundary and finite elements method to study the resonance characteristics of the hydraulic machines, Marine intelligent technologies) №2(36), Saint Petersburg, 2017.
3. Gutin L.Ya. Izbrannye Trudy. L.: Sudostroenie, (Selected Works, Leningrad, Shipbuilding) 1977. 599 s.
4. Miguel C.Junger. Radiation Loading of Cylindrical and Spherical Surfaces. J.Acoustic Soc.America, 1952.Vol. 24. N3. P. 288-289.
5. Timoshenko S.P. Kolebaniya v inzhenernom dele. M.: Mashinostroenie (Vibrartion in engineering. Moscow, Mashinostroenie), 1985. 472 s.
6. Zolotarevich V.P., Salienco A.E., Frumen A.I., Yugov N.V. Issledovanie sobstvennykh chastot i form kolebaniy lopasti rabocheho kolesa radial'no-osevoy gidroturbiny na osnove primeneniya sovmestnogo metoda konechnykh i granichnykh elementov. Morskіe intellektual'nye tekhnologii (Study of natural frequencies and mode shapes of the blade of the runner francis turbine on the basis of application coupled bem-fem methods, Marine intelligent technologies) №2(32), Saint Petersburg, 2016.
7. Zolotarevich V.P., Salienco A.E., Frumen A.I., Yugov N.V. Ispol'zovanie sovmestnogo metoda konechnykh i granichnykh kharakteristik dlya analiza rezonansnykh chastot rabocheho kolesa gidroturbiny. Morskіe intellektual'nye tekhnologii (Use of coupled boundary and finite elements method for analisys of resonance frequencies of runner of hydroturbine, Marine intelligent technologies) №2(32), Saint Petersburg, 2016.
8. С. М. Piaszczyk, J. M. Klosner, "Acoustic radiation from vibrating surfaces at characteristic frequencies", Journal Acoustic. Soc. Am. 75, 363-372, 1984.

УДК 621.224 (043)

## ПРИМЕНЕНИЕ СОВМЕСТНОГО МЕТОДА КОНЕЧНЫХ И ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРЯМОЙ ИМПЕДАНСНОЙ ПОСТАНОВКЕ К ИССЛЕДОВАНИЮ РЕЗОНАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Золотаревич Валерий Павлович**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры информационно-навигационных систем,  
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики  
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49  
e-mail: zolotarevich@yandex.ru

**Салиенко Александр Евгеньевич**

заместитель директора бизнес-единицы по ГТО – директор по науке и исследованиям,  
Акционерное общество «Тяжмаш»  
446010, г. Сызрань, ул. Гидротурбинная, д.13

**Фрумен Александр Исаакович**

кандидат технических наук, профессор  
ученый секретарь совета Санкт-Петербургского государственного морского технического университета,  
профессор кафедры строительной механики корабля,  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3

**Югов Николай Васильевич**

доктор технических наук, профессор  
начальник отдела информационных, цифровых и компьютерных инженерных технологий,  
ООО «ТГР Инжиниринг»  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 10/14

### Аннотация

В работе представлены физико-математические модели расчета собственных частот, форм колебаний, характеристик излучения, диаграмм направленности излучения различных инженерных конструкций и сооружений, включая корпусные конструкции судов, строительных помещений и транспортных средств. Отличительной особенностью таких конструкций является возможность применения аппарата, описывающего изменение кривизн поверхностей за счет изменения углов нормалей. Это обусловлено наличием поверхностей без резкого изменения направления нормалей.

Применение совместного метода конечных и граничных элементов позволяет учесть указанные особенности рассматриваемых конструкций. Приведено построение математических моделей системы «структура – среда», обеспечивающих дискретизацию интегрального уравнения Гельмгольца в алгоритмической форме для трехмерной и плоской постановок.

Возможности разработанного физико-математического и программно-алгоритмического аппарата продемонстрированы на примере исследования влияния акустических полей судов ледового плавания на экосистему северных морских путей. Разработанные алгоритмы позволяют значительно сократить трудоемкость математического моделирования объектов и снизить требования к ресурсам вычислительной техники.

**Ключевые слова:** Корпус судна, акустические характеристики механизмов, собственные частоты и формы, метод конечных элементов, метод граничных элементов, вибрации, резонансная частота.

## USE OF THE COPLD FINITE AND BOUNDARY ELEMENTS METHOD IN DIRECT IMPEDANCE FORMULATION TO THE STUDY OF THE RESONANT CHARACTERISTICS OF ENGINEERING CONSTRUCTIONS

**Valerii P. Zolotarevich**

PhD, Department of Information and Navigation Systems,  
 ITMO UNIVERSITY (SAINT PETERSBURG NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY OF INFORMATION  
 TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS)  
 49 Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russia  
 e-mail: zolotarevich@yandex.ru

**Alexandr E. Salienco**

Research and Development Director,  
 JSC "TYAZHMASH"  
 13 Hydroturbinnaya St., Syzran, Samara region, Russia, 446010

**Alexandr I. Frumen**

Professor, PhD  
 Department of structural mechanics of ships,  
 STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
 Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation

**Nicolay V. Yugov**

Professor, Dr. Sci. Tech.,  
 head of Department of information, digital and computer engineering technology,  
 LLC "TGR-Engineering"  
 Lotsmanskaya, 10/14, St. Petersburg 190008, Russian Federation

**Abstract**

The paper presents a physico-mathematical model of calculation of natural frequencies, mode shapes, characteristics of radiation, radiation patterns of various engineering structures, including hull structures of ships, construction of premises and vehicles. A distinctive feature of such structures is the possibility of using approach which describing the change of curvatures of surfaces by changing the angle of normals. This is due to the presence of surfaces without sharp changes of direction of the normals.

Use of the coupled finite and boundary elements method allows to take into account these features of the considered structures. The construction of mathematical models of the system "structure – fluid" was made that provides the discretization of the integral of the Helmholtz equation in algorithmic form for three- and two dimension cases.

Possibilities of the developed physico-mathematical and algorithmic and software of the apparatus is demonstrated on the example of research of influence of acoustic fields from hull of ice ship on the ecosystem of the north sea paths. The developed algorithms significantly reduce the complexity of mathematical modeling of objects and to reduce the resource requirements of computing.

**Key words:** Structures of ships, acoustic characteristics of mechanisms, natural frequencies and mode shapes, finite element method, boundary element method, vibration, resonance frequency.

**Введение**

Рассматриваются принципы построения математических моделей на основе совместного МКЭ/МГЭ в импедансной прямой формулировке.

В отличие от традиционной постановки совместного МКЭ/МГЭ [1,2], применение импедансного метода целесообразно для таких структур, у которых формирование конечно-элементных матриц жесткости, масс и демпфирования не связано с использованием какого-либо семейства функций форм конечных элементов, либо в том случае, когда информация о способе построения указанных матриц при трансляции конечно-элементной модели в гранично-элементный модуль отсутствует.

Приведенные далее соотношения пригодны как для внешней, так и для внутренней задачи.

**1. Конечно-элементная модель непогруженной структуры**

Первым шагом к решению связанной проблемы «структура – жидкость» при условиях гармонического возбуждения является получение обратной матрицы импедансов структуры  $[Z]$  (или матрицы податливостей  $[Y] = [Z]^{-1}$ ). Здесь  $[Z]$  — матрица импедансов, определяемая по формуле

$$[Z] = \frac{1}{i\omega} (-[M]\omega^2 + i\omega[B] + [K]), \quad (1)$$

где  $[M]$  — матрица масс,  $[B]$  — матрица демпфирования,  $[K]$  — матрица жесткости,  $\omega$  — циклическая частота. Размерность матриц  $S \times S$ , где  $S$  — суммарное число независимых степеней свободы всей системы.

Для матрицы  $[B]$  будем использовать модель пропорционального демпфирования:

$$E = E_0(1 + i\eta), \quad (2)$$

где  $E_0$  — модуль упругости,  $\eta$  — коэффициент потерь материала. В этом случае для матрицы демпфирования можно записать:

$$[B] = [K](1 + i\eta). \quad (3)$$

Матрица импедансов может быть получена непосредственно с помощью формулы (1), а затем обращена. Однако этот путь не является самым эффективным с вычислительной точки зрения. В основе более оптимального пути получения обратной матрицы импедансов лежит принцип суперпозиции собственных частот и форм колебаний структуры.

Обратная матрица импедансов является решением следующего матричного уравнения:

$$[Z][Z]^{-1} = [I_s], \quad (4)$$

где  $[I]$  — единичная матрица размера  $S \times S$ .

Пусть известно  $N$  решений обобщенной спектральной задачи:

$$([K] - \omega_\mu^2 [M])\{\Psi_\mu\} = 0, \quad (5)$$

где  $\mu = 1, \dots, N$ ,  $\omega_\mu$ ,  $\Psi_\mu$  — собственные частоты и формы конструкции. Причем матрица собственных форм  $[\Psi] = [\{\Psi_1\}, \dots, \{\Psi_N\}]$  удовлетворяет следующим условиям нормировки:

$$\begin{aligned} [\Psi]^T [M] [\Psi] &= [I_N] \\ [\Psi]^T [K] [\Psi] &= [D_\omega] \end{aligned}, \quad (6)$$

где  $[D_\omega]$  — диагональная матрица квадратов собственных частот системы.

Будем искать решение системы линейных уравнений (4) в виде:

$$[Z]^{-1} = [\Psi][\Phi], \quad (7)$$

где  $[\Phi]$  матрица, состоящая из столбцов вектора вкладов собственных форм размером  $L \times S$ . Подставляя (7) в (4) и умножая слева на транспонированную матрицу собственных форм  $[\Psi]^T$ , получаем:

$$[\Psi]^T [Z] [\Psi] [\Phi] = [\Psi]^T. \quad (8)$$

Учитывая условия нормировки (6), с учетом (1) и (3) можно записать

$$[D_z] = [\Psi]^T [Z] [\Psi] = \frac{1}{i\omega} (-\omega^2 [I_N] + (1 + i\eta) [D_\omega]). \quad (9)$$

Видно, что матрица  $[D_z]$  является диагональной, поэтому обратной к ней легко может быть найдена. С учетом (9) из (8) находим матрицу вкладов  $[\Phi]$ , которую необходимо подставить в (7). Окончательно получаем

$$[Z]^{-1} = [\Psi][D_z]^{-1}[\Psi]^T. \quad (10)$$

Уравнение (10) можно записать в явном виде:

$$[Z]_{kj}^{-1} = i\omega \sum_{\mu=1}^N \frac{\Psi_{k\mu} \Psi_{j\mu}}{-\omega^2 + (1 + i\eta)\omega_\mu^2} \quad (11)$$

В практических расчетах вместо коэффициента потерь материала  $\eta$  используют понятие модального демпфирования  $\beta_\mu = \frac{\eta\omega}{2\omega_\mu}$ . В этом случае соотношение (11) запишется в виде:

$$[Z]_{kj}^{-1} = i\omega \sum_{\mu=1}^N \frac{\Psi_{k\mu} \Psi_{j\mu}}{-\omega^2 + \omega_\mu^2 \left(1 + 2i\beta \frac{\omega_\mu}{\omega}\right)}. \quad (12)$$

С помощью выражения для матрицы податливости  $[Z]^{-1}$ , можно записать уравнение движения системы «структура – среда» следующим образом:

$$\{V\} = [Z]^{-1} \{F\} - [Z]^{-1} [G][A]\{p\}, \quad (13)$$

где  $\{V\}$  — вектор скоростей системы;  $\{F\}$  — вектор сил,  $[G]$  — матрица направляющих косинусов нормалей к «смоченной» поверхности размерности  $S \times L$ , где  $L$  — число узлов «смоченной» поверхности,  $[A]$  — диагональная матрица площадей «смоченной» поверхности ( $L \times L$ ), т.е. поверхности, разделяющей структуру и акустическую среду,  $\{p\}$  вектор амплитуд звукового давления, действующий на «смоченную»

Уравнение (13) использовано в дальнейшем как граничное условие интегрального уравнения Гельмгольца на «смоченной» поверхности.

## 2. Гранично-элементная модель внешней акустической среды

Далее приведено построение математических моделей системы «структура – среда», обеспечивающих дискретизацию интегрального уравнения Гельмгольца в алгоритмической форме для трехмерной и плоской постановок. В работах [3-6, 8-16] под руководством Югова Н.В. приведено построение интегрального уравнения Гельмгольца иным способом, который, однако, дает ясное представление о том, как в процессе дискретизации формируются вклады КЭ «смоченной» поверхности в недиагональные и диагональные члены дискретизированных («жидких») матриц  $[E]$  и  $[C]$ , описывающих взаимодействие системы «структура – среда».

Пусть внутри некоторого условного объема  $E$ , ограниченного поверхностями  $S$  и  $S'$  (рис. 1) существует два звуковых поля  $P(x')$  и  $G(x, x')$ , удовлетворяющих уравнениям Гельмгольца:

$$\Delta P(x') + k^2 P(x') = 0; \quad (14)$$

$$G(x, x') + k^2 G(x, x') = -\delta(x, x'), \quad (15)$$

где  $P(x')$  — давление звуковой волны;  $x'$  — положение вектора в точке  $l$ ;  $\delta(x, x')$  — дельта функция Дирака;  $x$  — положение вектора в точке  $J$ ,

находящейся на поверхности  $S$  или  $S'$ . В дальнейшем поверхность  $S$  является излучающей. В качестве  $S'$  рассмотрим сферу достаточно большого радиуса.

Введем вектор  $r$ , соединяющий точки  $I$  и  $J$ , находящиеся на поверхности, тогда для функции Грина можно записать:

$$\int_{S+S'} \left( P(x) \frac{\partial G(x, x')}{\partial n} - G(x, x') \frac{\partial P(x)}{\partial x} \right) dS = \begin{cases} -P(x'), & x' \in E \\ -\frac{1}{2} P(x'), & x' \in S+S' \\ 0, & x' \notin E \end{cases} \quad (16)$$

В выражении (17) считается, то нормаль направлена наружу области  $E$  ( $n = n_{вн}$  на рис. 1).

В силу условия излучения Зоммерфельда интеграл по поверхности  $S'$  будет стремиться к нулю при стремлении радиуса сферы к бесконечности. Учитывая это, и считая, что нормаль

$$\int_S \left( P(x) \frac{\partial G(x, x')}{\partial n} - G(x, x') \frac{\partial P(x)}{\partial n} \right) dS = \frac{1}{2} P(x'), \quad x' \in S \quad (17)$$

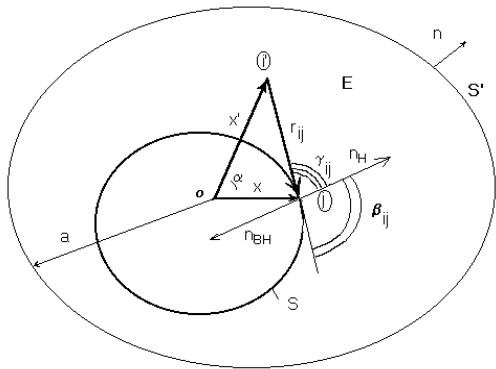


Рис. 1. Пояснение к уравнению Гельмгольца

$$\frac{1}{2} P(x') - \int_S \left( P(x) \frac{e^{-ikr}}{4\pi r} \left( ik + \frac{1}{r} \right) \cos\beta \right) dS = i\omega\rho \int_S V_n(x) \frac{e^{-ikr}}{4\pi r} dS, \quad x' \in S \quad (18)$$

Это интегральное уравнение связывает давление  $P$  и нормальную скорость  $V_n$  на поверхности  $S$ .

Представленное выше окончательное интегральное уравнение (21) пригодно и для решения внутренней задачи. Вывод его аналогичен. Отличие состоит лишь в том, что на рис.1 объем  $E$  будет находиться внутри поверхности  $S$ , а в формуле (19) в качестве нормали к поверхности  $S$  будет использована внутренняя нормаль.

Выполняя дискретизацию интегрального уравнения (21) в трехмерном представлении, получим матричное уравнение для значений давления  $P$  и нормальной скорости  $V_n$  в дискретных точках (узлах поверхностной сетки граничных элементов) поверхности  $S$ :

$$[E]\{P\} = [C]\{V_n\}. \quad (22)$$

Размерность матриц  $[E]$  и  $[C]$  равна  $L \times L$ .

Для недиагональных коэффициентов матриц  $[E]$  и  $[C]$  можно записать следующее приближение:

$$G(x, x') = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r} \quad (16)$$

Умножим уравнение (14) на  $G(x, x')$ , а (15) на  $P(x')$  и вычтем из второго первое. Интегрируя по объему  $V$ , и используя формулу Грина, а также свойства дельта функции и свойства функции Грина, получаем:

$$\begin{cases} x' \in E \\ x' \in S+S' \\ x' \notin E \end{cases} \quad (17)$$

направлена наружу поверхности  $S$  ( $n = n_n$  на рис. 1), получаем следующее интегральное уравнение Гельмгольца для случая, когда  $x'$  лежит на поверхности  $S$ :

Используем в дальнейшем связь производной от давления по нормали и внешней нормальной компоненты скорости  $V_n$ :

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -i\omega\rho V_n. \quad (19)$$

Нормальная производная функции Грина может быть вычислена таким образом (рис. 1):

$$\frac{\partial G(r)}{\partial n} = -\frac{e^{-ikr}}{4\pi r} \left( ik + \frac{1}{r} \right) \frac{\partial r}{\partial n} = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r} \left( ik + \frac{1}{r} \right) \cos\beta, \quad (20)$$

где  $\beta$  — угол между векторами  $r$  и  $n$ .

Подстановка выражений (19) и (20) в уравнение (18) дает следующее выражение:

$$\begin{aligned} E_{IJ} &= -\frac{e^{-ikr_{IJ}}}{4\pi r_{IJ}} \left( ik + \frac{1}{r_{IJ}} \right) \cos\beta_{IJ} A_J \\ C_{IJ} &= i\omega\rho \frac{e^{-ikr_{IJ}}}{4\pi r_{IJ}} A_J \end{aligned} \quad (23)$$

Наиболее точно значения площадей  $A_J$ , соответствующих узлу  $J$ , получаются из конечно-элементного расчета результирующего вектора сил реакций в узлах от воздействия внешнего статического единичного давления на “смоченную” поверхность структуры.

Формулы (23) применимы только для недиагональных членов матриц  $[E]$  и  $[C]$ . Для диагональных членов матриц  $[E]$  и  $[C]$ , для которых  $r_{JJ} = 0$ , интегралы в уравнении (21) должны быть вычислены другим методом. В работе [31] показано, что для диагональных элементов матриц можно использовать следующие выражения:

$$E_{ij} = \frac{1}{2} - \frac{\sigma_i}{4} \left( \sqrt{\frac{A_i}{\pi}} + ik \frac{A_i}{\pi} \right), \quad (24)$$

$$C_{ij} = i\omega\rho\sqrt{\frac{A_i}{\pi}}$$

где  $\sigma_i$  — кривизна поверхности в узле  $i$ .

Таким образом, дискретизация уравнения (21) приводит к системе линейных алгебраических уравнений. Матрицы  $[E]$  и  $[C]$  являются комплексными, несимметричными, плотнозаполненными и частотозависимыми.

Идеальным случаем для разработчика математических моделей и программного обеспечения является такая ситуация, когда есть возможность поэтапной проверки первичных разработанных программных блоков (например, аналитическим способом) путем последовательного перехода к более сложным программным структурам, включающим в себя предыдущие (более простые). Поэтому отработка и тестирование математических моделей и соответствующего им программного обеспечения велась в следующей последовательности:

- плоская модель (бесконечные цилиндры);
- трехмерная модель.

$$\frac{1}{2}P(x') - \frac{ik}{4} \int_{\ell} P(x) H_1^{(2)}(kr) \cos\beta d\ell = -\frac{\omega\rho}{4} \int_{\ell} V_n(x) H_0^{(2)}(kr) d\ell, \quad x' \in \ell \quad (25)$$

Дискретизация уравнения (25) приводит к следующим выражения для коэффициентов матриц  $[E]$  и  $[C]$ :

$$E_{ij} = \frac{ki}{4} H_1^{(2)}(kr_{ij}) L_j \cos\beta_{ij}, \quad i \neq j \quad (26)$$

$$E_{ii} = \frac{1}{2} - \sigma_i \frac{L_i}{4\pi}, \quad i = j$$

$$C_{ij} = -\frac{\omega\rho}{4} H_0^{(2)}(kr_{ij}) L_j, \quad i \neq j \quad (27)$$

$$C_{ii} = \frac{\omega\rho}{4} L_i \left( 1 - i \frac{2}{\pi} \left( \lambda - 1 + \ln\left(\frac{kL_i}{4}\right) \right) \right), \quad i = j$$

В формуле (27)  $\lambda = 0.5772157$  — постоянная Эйлера.  $L_i$  — длина дуги контура в узле  $i$ .

При вычислении компоненты матриц  $[E]$  и  $[C]$  следует помнить, что выражения для  $C_{ij}$  и  $E_{ij}$  являются приближенными и поэтому размер шага численного интегрирования (или, другими словами, размер конечного элемента модели) должен выбираться, исходя из следующего ограничения:  $kL_i < 1$ . Это вытекает из приближенного представления функций Бесселя и Ханкеля в виде суммы членов усеченного ряда.

## 2. Модель связанной системы "структура-жидкость"

На основе уравнений (13) и (22), используя связь между вектором скорости структуры и вектором нормальной скорости среды на «смоченной» поверхности (условие неразрывности)

$$\{V_n\} = [G]^T \{V\}. \quad (28)$$

В случае цилиндра, имеющего бесконечную длину и нагруженного бесконечно протяженной силой (плоская задача), интегральное уравнение из трехмерного преобразуется в двумерное, т.е. численное интегрирование по поверхности сводится к интегрированию по контуру  $\ell$  в плоскости X-Y (см. рис.2), по координате Z интегрирование проводится аналитически.

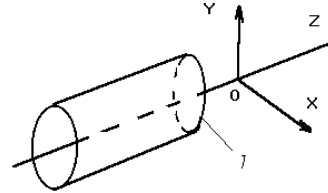


Рис. 2. Система координат для бесконечного цилиндра

Можно показать [6], что функция Грина для плоской задачи равна  $\frac{i}{4} H_0^{(2)}(kr)$ , где  $H_0^{(2)}$  функция Ханкеля второго рода нулевого порядка. В этом случае интегральное уравнение (21) запишется в следующем виде:

можно записать связанное уравнение для системы «структура – жидкость»:

$$[H]\{p\} = \{Q\}, \quad (29)$$

где

$$[H] = [E] + [C][G]^T [Z]^{-1} [G][A], \quad (30)$$

$$\{Q\} = [C][G]^T [Z]^{-1} \{F\}$$

Решая систему линейных алгебраических уравнений (29) можно определить давления на поверхности структуры, а затем с помощью уравнения (13) – колебательные скорости.

Матрица  $[H]$ , как и «жидкие» матрицы  $[E]$  и  $[C]$  являются комплексными плотнозаполненными несимметричными, зависящими от частоты. В случае контакта конструкции с «тяжелой» средой (например, водой) имеем наиболее трудоемкую полную схему решения системы (29). Для расчета уровней звукового давления в системе «структура-воздух» («легкая среда») используется усеченное (без второго слагаемого) соотношение (30).

На примере плоской задачи показано, что размер шага численного интегрирования (или размер элемента на «смоченной» поверхности) должен выбираться, исходя из условия  $kL < 1$ . Это требование распространяется на все типы частных моделей: плоских и трехмерных.

После нахождения значений давления  $\{p\}$  и нормальных скоростей  $\{V_n\}$  на поверхности тела. Давление в любой точке объема может быть вычислено на основе численного интегрирования соотношения (17) для случая  $x' \in E$ :

$$P(x') = \int_S \left( P(x) \frac{\partial G(x, x')}{\partial n} - i\omega\rho G(x, x') V_n(x) \right) dS, \quad (31)$$

Процедура вычисления интеграла (31) аналогично схеме вычисления недиагональных элементов «жидких» матриц [E] и [C]. Для трехмерной и плоской задачи это приводит к следующим выражениям для давления в точке I.

$$P_i = \sum_j -P_j \frac{e^{-ikr_{ij}}}{4\pi r_{ij}} \left( ik + \frac{1}{r_{ij}} \right) \cos\beta_{ij} A_j + i\omega\rho V_{nj} \frac{e^{-ikr_{ij}}}{4\pi r_{ij}} A_j, \quad (32)$$

$$P_i = \sum_j -P_j \frac{ik}{4} H_1^{(2)}(kr_{ij}) \cos\beta_{ij} L_j + \frac{\omega\rho}{4} V_{nj} H_0^{(2)}(kr_{ij}) L_j. \quad (33)$$

Располагая решением на поверхности структуры (давление и колебательная скорость) можно также определить полную мощность излучения структуры по формуле:

$$W = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_S P V_n^* dS = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \sum_I P_I V_{nI}^* A_I, \quad (34)$$

где звездочка означает операцию комплексного сопряжения.

В работе [3,7] приведено тестирование численных решений системы «структура-среда» на основе совместного метода конечных и граничных элементов в импедансной прямой формулировке (метод коллокаций) для моделей имеющих точные аналитические решения (бесконечный цилиндр-плоская задача, пульсирующая сфера и круглая мембрана в жестком экране).

### 5. Пример моделирования и расчета звуковых полей челночного ледового танкера

На рис. 3. приведен пример конечно-элементной модели челночного ледового танкера, которая использовалась для исследования влияния акустических полей на экосистему северных морских путей.

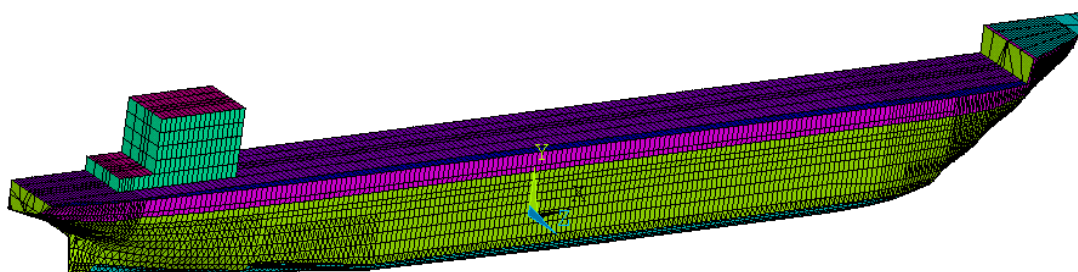


Рис. 3. Конечно-элементная модель ЧЛТ. Вид с правого борта (1/2 модели)

В результате выполненных исследований показано, что балочные собственные частоты ЧЛТ лежат в области частот от 0.8 до 3 Гц. Оболочечные формы колебаний ЧЛТ начинаются с частот 7–10 Гц. На рис. 4 приведены спектральные уровни звукового давления для ЧЛТ соответственно на дистанции 1000 м (относительно 1 мкПа в полосе частот 1Гц и приведены к дистанции 1 м, как это принято в зарубежных исследованиях). Уровни подводного шума при возбуждении со стороны винтов в диапазоне частот от 0 до 12 Гц имеют по международной классификации следующие значения от 155 до 198 дБ для ЧЛТ.

Качественное сравнение результатов расчета собственных частот с данными, имеющимися для прототипов, указывает на то, что они находятся в нужном диапазоне частот.

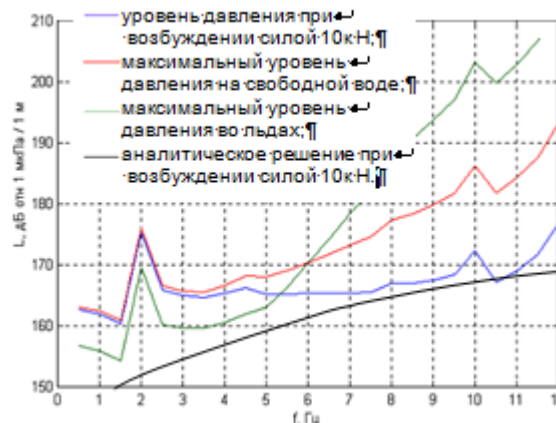


Рис. 4. Максимальные уровни звукового давления излучения ЧЛТ

### Заключение

Импедансный метод в прямой формулировке имеет преимущество перед остальными в том случае, когда семейство функций форм конечных элементов, используемых при построении матриц жесткости, масс и демпфирования не задано.

Вышеизложенные методы позволяют рассчитывать акустические характеристики судовых конструкций, строительных помещений, транспортных средств и других инженерных сооруже-

ний, включая распределение акустических полей в легких и тяжелых средах, диаграммы направленности и характеристики звукоизоляции.

Созданный программный комплекс, предложенные подходы в формировании КЭ/ГЭ моделей и методология построения функциональных расчетных схем могут быть распространены на решение задач акустического проектирования надводных судов любых типов. Разработанный метод основан на введении на уровне ватерлинии искусственной зеркальной плоскости симметрии с последующим наложением матрицы собственных векторов на «смоченную» поверхность ниже ватерлинии. При этом решение задачи производится в редуцированных модальных координатах. Необходимая информация по отброшенной части структуры выше ватерлинии, как, впрочем, и по всей структуре хранится в предварительно определенных модах колебаний

для всей конструкции. В зависимости от вида возбуждения решается симметричная, кососимметричная или общая (при произвольном виде возбуждения) задача, являющаяся суммой решений для первых двух случаев.

В качестве примера приведена сеточная модель челночного ледового танкера. Методология построения КЭ/ГЭ моделей судов ледового плавания (СЛП) подтверждена качественным сравнением полученных расчетных результатов с данными по прототипам. Представленное в настоящей главе конечно-элементное моделирование СЛП, включая электронные акустические модели СЛП, а также решение задачи излучения частично погруженных структур выполнены впервые в России.

Многочисленные конструкции, исследованные авторами [8-16], остались за пределами статьи в силу ограничения объема статьи.

### Литература

1. Gordon C. Evestine Francis M. Henderson Coupled finite element/boundary element approach for fluid-structure interaction. J. Acoustic Soc.America,1990.Vol. 87. N5. P.1938-1947.
2. Richard A. Jeans and Ian C. Mathews Solution of fluid-structure interaction problems using a coupled finite element and variational boundary element technique. J. Acoustic Soc.America,1990.Vol. 88. N5. P.2459-2466.
3. Югов Н.В. Применение методов конечных и граничных элементов к исследованиям динамических и акустических характеристик транспортных средств и инженерных сооружений. Доклад на XVII Международной конференции "Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов". Санкт-Петербург. 1999, с 305-308.
4. Симин Н.О. Разработка численных методов расчета виброакустических характеристик погруженных судовых корпусных конструкций. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1997 г.
5. Югов Н.В., Минин Р.А. Программный комплекс на основе МКЭ/МГЭ по расчету воздушного шума в помещениях. Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, сб.: "Средства снижения вибрации и шума. Конверсионные работы". Вып. 15, 2002.
6. Симин Н.О., Тисленко И.Н., Югов Н.В. Численный анализ звукоизлучения замкнутых оболочек методом конечных и граничных элементов вблизи характеристических частот. Труды второй международной конференции по судостроению. Секция Е: "Физические поля судов и океана (акустика, электродинамика, магнетизм и гидрофизика), обитаемость судов". ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова,1998,стр.213-220.
7. Золотаревич В.П., Салиенко А.Е., Фрумен А.И., Югов Н.В. Сравнительный анализ численных решений в совместном методе конечных и граничных элементов с экспериментальными данными для гидромашин и некоторыми аналитическими приближениями. Морские интеллектуальные технологии, №2(36), Санкт-Петербург, 2017.
8. Ионов А.В., Симин Н.О., Югов Н.В. Акустическая оптимизация многоотсечных цилиндрических оболочек методом конечных элементов. Техническая Акустика, Т. II. Вып.3(5). 1993. С.8-12.
9. Ионов А.В.,Симин Н.О., Югов Н.В. Acoustical optimization of complex closed shells equipped with interior structure by numerical methods (Акустическая оптимизация сложных замкнутых оболочек с внутренним насыщением численными методами). Report Internoise. St.-Petersburg. 1993.
10. Минин Р.А., Симин Н.О., Югов Н.В. Исследование прочностных и физико-механических характеристик гофрированных композитных оболочек методом конечных элементов. Труды второй международной конференции по судостроению. Секция С: "Прочность, надежность и ресурс корпусов судов и морских сооружений". ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, Санкт-Петербург, 1998, стр. 417-424
11. Югов Н.В., Минин Р.А. Применение методов конечных элементов и граничных элементов к исследованию виброакустических характеристик обитаемых помещений стационарных буровых платформ. Доклад на научном семинаре Санкт-Петербургского Дома Ученых "Проблемы освоения Российского Арктического шельфа". Санкт-Петербург, 1999.
12. Югов Н.В., Минин Р.А. Определение характеристик распределения звуковых полей внутри судовых помещений методами конечных и граничных элементов. Доклад на XVII международной конференции "Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов". Санкт-Петербург, 1999, стр. 196-199.
13. Югов Н.В., Ионов А.В., Минин Р.А. Моделирование вибрационных и акустических полей в судовых корпусных конструкциях. Доклад на XVIII Международной конференции "Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов". ВЕМ/FEM-2000. Санкт-Петербург, 2000.



14. Югов Н.В., Минин Р.А., Золотаревич В.П. Определение характеристик распределения гидроакустических полей судов методом граничных и конечных элементов. Доклад на XVIII Международной конференции "Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов". ВЕМ/FEM-2000.
15. Югов Н.В., Ионов А.В., Симин Н.О. Акустическая оптимизация многосекционных цилиндрических оболочек методом конечных элементов. Техническая акустика т. II, вып. 3(5), 1993.
16. Югов Н.В., Симин Н.О. Программный комплекс по расчету акустических полей корпусов судов. Труды второй международной конференции по судостроению. Секция Е: "Физические поля судов и океана (акустика, электродинамика, магнетизм и гидрофизика), обитаемость судов". ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Санкт-Петербург, 1998, стр. 124-129

#### References

1. Gordon C. Evestine Francis M. Henderson Coupled finite element/boundary element approach for fluid-structure interaction. J. Acoustic Soc.America,1990.Vol. 87. N5. P.1938-1947.
2. Richard A. Jeans and Ian C. Mathews Solution of fluid-structure interaction problems using a coupled finite element and variational boundary element technique. J. Acoustic Soc.America,1990.Vol. 88. N5. P.2459-2466.
3. Yugov N.V. Primenenie metodov konechnykh i granichnykh jelementov k issledovanijam dinamicheskih i akusticheskikh harakteristik transportnykh sredstv i inzhenernykh sooruzhenij. Doklad na XVII Mezhdunarodnoj konferencii "Matematicheskoe modelirovanie v mehanike sploshnykh sred na osnove metodov granichnykh i konechnykh jelementov". Sankt-Peterburg. 1999, s 305-308.
4. Simin N.O. Razrabotka chislennykh metodov rascheta vibroakusticheskikh harakteristik pogru-zhennykh sudovykh korpusnykh konstrukcij. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk. CNII im. akad. A.N. Krylova, 1997 g.
5. Yugov N.V., Minin R.A. Programmnij kompleks na osnove MKJe/MGJe po raschetu vozdušnogo shuma v pomeshhenijah. Trudy CNII im. akad. A. N. Krylova, sb.: "Sredstva snizhenija vibracii i shuma. Konversionnye raboty". Vyp. 15, 2002.
6. Simin N.O., Tislenko I.N., Yugov N.V. Chislennyj analiz zvukoizluchenija zamknutykh obolochek metodom konechnykh i granichnykh jelementov vblizi harakteristicheskikh chastot. Trudy vtoroj mezh-dunarodnoj konferencii po sudostroeniju. Sekcija E: "Fizicheskie polja sudov i okeana (akustika, jelektrodinamika, magnetizm i gidrofizika), obitaemost' sudov". CNII im. akad. A.N.
7. Zolotarevich V.P., Salienko A.E., Frumen A.I., Yugov N.V. Cravnitel'nyj analiz chislennykh reshenij v sovместnom metode konechnykh i granichnykh jelementov s jeksperimental'nymi dannymi dlja gidromashin i nekotorymi analiticheskimi priblizhenijami. Morskie intellektual'nye tehnologii, №2(36), Sankt-Peterburg, 2017.
8. Ionov A.V., Simin N.O., Yugov N.V. Akusticheskaja optimizacija mnogootsechnykh cilindricheskikh obolochek metodom konechnykh jelementov. Tehniceskaja Akustika, T. II. Vyp.3(5). 1993. S.8-12.
9. Ionov A.V., Simin N.O., Yugov N.V. Acoustical optimization of complex closed shells equipped with interior structure by numerical methods (Akusticheskaja optimizacija slozhnykh zamknutykh obolochek s vnutrennim nasyshtenim chislennymi metodami). Report Internoise. St.-Petersburg. 1993.
10. Minin R.A., Simin N.O., Yugov N.V. Issledovanie prochnostnykh i fiziko-mehaniceskikh harakteristik gofrirovannykh kompozitnykh obolochek metodom konechnykh jelementov. Trudy vtoroj mezh-dunarodnoj konferencii po sudostroeniju. Sekcija S: "Prochnost', nadezhnost' i resurs korpusov sudov i morskikh sooruzhenij". CNII im. akad. A.N. Krylova. Sankt-Peterburg, Sankt-Peterburg, 1998. str. 417-424
11. Yugov N.V., Minin R.A. Primenenie metodov konechnykh jelementov i granichnykh jelementov k is-sledovaniju vibroakusticheskikh harakteristik obitaemykh pomeshhenij stacionarnykh burovnykh platform. Doklad na nauchnom seminare Sankt-Peterburgskogo Doma Uchenykh "Problemy osvoenija Rossijskogo Arkticheskogo shel'fa". Sankt-Peterburg, 1999.
12. Yugov N.V., Minin R.A. Opredelenie harakteristik raspredelenija zvukovykh polej vnutri sudovykh pomeshhenij metodami konechnykh i granichnykh jelementov. Doklad na XVII mezh-dunarodnoj konferencii "Matematicheskoe modelirovanie v mehanike sploshnykh sred na osnove metodov granichnykh i konechnykh jelementov". Sankt-Peterburg, 1999, str. 196-199.
13. Yugov N.V., Ionov A.V., Minin R.A. Modelirovanie vibracionnykh i akusticheskikh polej v sudovykh korpusnykh konstrukcijah. Doklad na XVIII Mezhdunarodnoj konferencii "Matematicheskoe modelirovanie v mehanike sploshnykh sred na osnove metodov granichnykh i konechnykh jelementov". BEM/FEM-2000. Sankt-Peterburg, 2000.
14. Yugov N.V., Minin R.A., Zolotarevich V.P. Opredelenie harakteristik raspredelenija gidro-akusticheskikh polej sudov metodom granichnykh i konechnykh jelementov. Doklad na XVIII Mezhdunarodnoj konferencii "Matematicheskoe modelirovanie v mehanike sploshnykh sred na osnove metodov granichnykh i konechnykh jelementov". BEM/FEM-2000.
15. Yugov N.V., Ionov A.V., Simin N.O. Akusticheskaja optimizacija mnogosekcionnykh cilindricheskikh obolochek metodom konechnykh jelementov. Tehniceskaja akustika t. II, vyp. 3(5), 1993.
16. Yugov N.V., Simin N.O. Programmnij kompleks po raschetu akusticheskikh polej korpusov sudov. Trudy vtoroj mezh-dunarodnoj konferencii po sudostroeniju. (A software for calculation of acoustic fields of ships hulls. Proceedings of the second international conference on shipbuilding). Sekcija E: "Fizicheskie polja sudov i okeana (akustika, jelektrodinamika, magnetizm i gidrofizika), obitaemost' sudov". CNII im. akad. A.N. Krylova. Sankt-Peterburg, 1998, str. 124-129

УДК 621.224 (043)

## ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОВМЕСТНОГО МЕТОДА КОНЕЧНЫХ И ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ К ИССЛЕДОВАНИЮ РЕЗОНАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОПАСТНЫХ ГИДРОМАШИН

**Золотаревич Валерий Павлович**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры информационно-навигационных систем,  
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики  
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49  
e-mail: zolotarevich@yandex.ru

**Салиенко Александр Евгеньевич**

заместитель директора бизнес-единицы по ГТО – директор по науке и исследованиям,  
Акционерное общество «Тяжмаш»  
446010, г. Сызрань, ул. Гидротурбинная, д.13

**Фрумен Александр Исаакович**

кандидат технических наук, профессор  
ученый секретарь совета Санкт-Петербургского государственного морского технического университета,  
профессор кафедры строительной механики корабля,  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

**Югов Николай Васильевич**

доктор технических наук, профессор  
начальник отдела информационных, цифровых и компьютерных инженерных технологий,  
ООО «ТГР Инжиниринг»  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10/14  
e-mail: fedor\_n47@mail.ru

### Аннотация

В работе представлены физико-математические модели расчета собственных частот, форм колебаний и резонансных характеристик лопастных машин, работающих в тяжелых акустических средах, в частности в воде. К ним относятся машины из различных областей техники: компрессоры, насосные станции, гидротурбины и судовые винты. При этом для получения тех или иных характеристик (характер течения в проточных частях, вихреобразования, кавитации, акустического излучения и диаграммы направленности, собственных частот и форм колебаний, резонансных характеристик, прочности) требуются применение численных методов. Применительно к гидротурбинам особое место занимает исследование резонансных характеристик совместным методом конечных и граничных элементов. Отражением этого в физико-математических моделях рабочих колес гидротурбин, в отличие от судовых корпусных конструкций, является невозможность применения аппарата, описывающего изменение кривизн поверхностей за счет изменения углов нормалей. Это обусловлено сложностью геометрических поверхностей лопастей. Одним из возможных способов решения данной проблемы является применение аппарата функций форм, которые и рассмотрены в данной работе.

Предварительные исследования собственных частот и форм колебаний рабочих колес в воздухе, служат для получения решения в виде суперпозиции этих форм, которая применяется для получения решения собственных колебаний колеса в воде. Конечно-элементная сетка поверхностей лопастей в воздухе является более мелкой и отражает все особенности поверхности. Применяются как гексагональные 20-узловые элементы, так и тетраэдральные 10-узловые элементы. Применение тетраэдральных элементов позволяет значительно снизить трудоемкость создания сеточной области. В свою очередь применение гексагональных элементов позволяет повысить точность решения. «Смоченные» поверхности лопастей и колеса могут иметь более грубую сетку при наложении на них «сухих» форм..

**Ключевые слова:** Рабочее колесо, радиально-осевая гидротурбина, поворотнo-лопастная гидротурбина, собственные частоты и формы, метод конечных элементов, метод граничных элементов, вибрации, резонансная частота.

# CHARACTERISTIC FEATURES USING OF THE COUPLED BOUNDARY AND FINITE ELEMENTS METHOD TO STUDY THE RESONANCE CHARACTERISTICS OF THE HYDRAULIC MACHINES

**Valerii P. Zolotarevich**

PhD, Department of Information and Navigation Systems,  
ITMO UNIVERSITY (SAINT PETERSBURG NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS)  
49 Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russia  
e-mail: zolotarevich@yandex.ru

**Alexandr E. Salienco**

Research and Development Director,  
JSC "TYAZHMASH"  
13 Hydroturbinnaya St., Syzran, Samara region, Russia, 446010

**Alexandr I. Frumen**

Professor, PhD  
Department of structural mechanics of ships,  
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation

**Nicolay V. Yugov**

Professor, Dr. Sci. Tech.,  
head of Department of information, digital and computer engineering technology,  
LLC "TGR-Engineering"  
Lotsmanskaya, 10/14, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: fedor\_n47@mail.ru

## Abstract

The paper presents a physic-mathematical model of calculation of eigenfrequencies, eigenmodes, and resonance characteristics of blade machines that work in heavy acoustic environments, in particular in water. These include machines from different fields of technology: compressors, pumps, turbines and marine screws. To obtain certain characteristics (nature of the flow, vortex formation, cavitation, acoustic radiation and directivity diagram, the natural frequencies and mode shapes, the resonance characteristics, strength) requires the use of numerical methods. In relation to the turbines occupies a special place the study of the resonant characteristics of the joint using finite and boundary elements. The reflection of this in the physical and mathematical models of working wheels of hydraulic turbines, in contrast to the ship hull constructions is the impossibility of application of the apparatus, describing the change of curvatures of surfaces by changing the angle of normals. This is due to the geometric complexity of the surfaces of the blades. One possible solution to this problem is the use of functions of the forms, which are considered in this work.

A preliminary study of natural frequencies and mode shapes of the runner in the air, are used to get the solution as a superposition of these forms, which are used to obtain a solution of natural vibrations of the runner in the water. Finite element mesh of the surfaces of the blades in the air is smaller and reflects the surface features. Apply as hexagonal 20-node elements and tetrahedral 10-node elements. The use of tetrahedral elements allows to significantly reduce the complexity of creating a mesh region. In turn, the use of hexagonal elements allows to increase the accuracy of the solution. "Wet" surface of the blades and wheel can have a coarser mesh when applying them "dry" forms.

Francis turbine, Kaplan turbine, natural frequencies and mode shapes, finite element method, boundary element method, vibration, resonance frequency.

**Key words:** Francis turbine, Kaplan turbine, natural frequencies and mode shapes, finite element method, boundary element method, vibration, resonance frequency.

## Введение

В работах [1,2] были продемонстрированы возможности применения совместного метода конечных и граничных элементов к задачам расчета собственных частот и форм рабочих колес

гидротурбин. В данной работе рассмотрены некоторые особенности указанного подхода.

Рассмотрен метод расчета резонансных характеристик, включая расчеты собственных частот и форм колебаний лопастных машин, где кривизны поверхностей сложно описать изменением функции нормали в зависимости от обоб-

щенной координаты поверхности. В связи с этим приходится прибегать как к аппарату функций форм, так и к наложению суперпозиции форм колебаний лопастей и рабочих колес в воздухе на сетку лопастей и колеса в воде.

Приведен алгоритм расчета собственных форм и частот колебаний с учетом присоединенных масс жидкости и присоединенной жесткости жидкости.

Рассмотренные алгоритмы проиллюстрированы примером расчета собственных частот лопасти рабочего колеса, погруженной в воду.

**1. Совместный метод конечных и граничных элементов на основе прямой формулировки с применением аппарата функций форм**

Для структуры, погруженной в жидкость, рассмотрим функцию Лагранжа

$$J_{st} = W_{st} + U_{st} - T_{st}, \quad (35)$$

где  $W_{st}$  — потенциальная энергия деформации,  $U_{st}$  — потенциальная энергия внешних сил, — кинетическая энергия структуры, которые определяются следующими выражениями:

$$W_{st} = \frac{1}{2} \int_V \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\}; \quad (36)$$

$$U_{st} = - \int_V \{u\}^T \{F_V\} dV - \int_S \{u\}^T \{F_S\} dS; \quad (37)$$

$$T_{st} = \frac{1}{2} \omega^2 \int_V \rho_s \{u\}^T \{u\}, \quad (38)$$

где  $\{\varepsilon\}$  — вектор деформаций,  $\{u\}$  — вектор перемещений,  $\rho_s$  — плотность структуры,  $\{F_S\}$  — вектор плотности поверхностных сил, обусловленных давлением жидкости,  $\{F_V\}$  — вектор плотности нагрузок, приложенных к заданным точкам структуры,  $[D]$  — матрица упругости, связывающая вектора напряжений  $\{\sigma\}$  и деформаций  $\{\varepsilon\}$ ,  $V, S$  — объем структуры и площадь смоченной поверхности (рис. 1)..

Представленные ниже матричные уравнения математической модели системы «структура–среда» [3] на основе функции Лагранжа и конечно-элементного аппарата функций форм (прямая формулировка) построены с использованием матриц  $[E]$  и  $[C]$  дискретизированного уравнения Гельмгольца, полученными в [3] для импедансного метода в трехмерной постановке.

Пусть структура находится под действием гармонических сил  $\{F_v\}$  с частотой  $\omega$ . Разобьем структуру на ряд конечных элементов. Значения перемещений в каждом конечно-элементе структуры аппроксимируется функциями форм  $[N_s^e]$ . В результате получим следующие зависимости:

$$\begin{cases} \{u\} = [N_s^e] \{u^e\}; \\ \{\varepsilon\} = [B_s^e] \{u^e\}, \end{cases} \quad (39)$$

где  $[B_s^e]$  — матрица производных по координатам функций форм конечного элемента в соответствии с дифференциальным оператором  $L$  определяемым соотношением  $\varepsilon = Lu$ ,  $\{u^e\}$  — вектор перемещений в узлах конечного элемента.

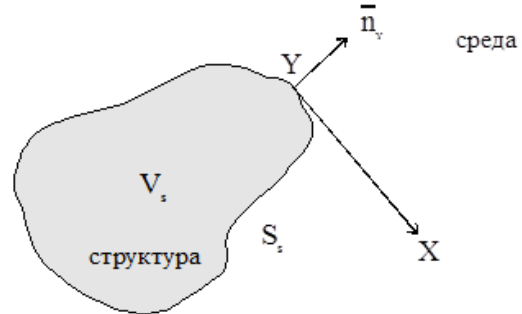


Рис. 1. Модель внешней акустической задачи

Тогда выражения (2), (3) и (4) преобразуются к виду:

$$W_{st} = \frac{1}{2} \sum_e \int_{V^e} \{u^e\}^T [B_s^e]^T [D] [B_s^e] \{u^e\} dV^e; \quad (40)$$

$$\begin{aligned} U_{st} = & - \sum_e \int_{V^e} \{u^e\}^T [N_s^e] \{F_v^e\} dV^e - \\ & - \sum_{e_s} \int_{S^e} \{u^e\}^T [N_s^e] \{F_s^e\} dS^e; \end{aligned} \quad (41)$$

$$T_{st} = \frac{1}{2} \omega^2 \sum_e \int_{V^e} \rho_s \{u^e\}^T [N_s^e]^T [N_s^e] \{u^e\} dV^e, \quad (42)$$

где  $\{F_v^e\}$  — вектор узловых нагрузок конечных элементов;  $\{F_s^e\}$  — вектор поверхностных сил, приведенный к узлам конечного элемента. Суммирование выполняется по всем элементам  $e$  или по граням смоченной поверхности  $s_e$ .

Введем обозначения

$$[K] = \sum_e \int_{V^e} [B_s^e]^T [D] [B_s^e] dV^e; \quad (43)$$

$$[M] = \sum_e \int_{V^e} \rho_s [N_s^e]^T [N_s^e] dV^e; \quad (44)$$

$$\{F_v\} = - \sum_e \int_{V^e} [N_s^e] \{F_v^e\} dV^e; \quad (45)$$

$$\{F_s\} = \sum_{e_s} \int_{S^e} [N_s^e]^T \{F_s^e\} dS^e, \quad (46)$$

где  $[K]$  — общая матрица жесткости структуры,  $[M]$  — общая матрица масс структуры,  $\{F_v\}$  — общий вектор сил в узлах конечно-элементной сетки, приложенных к структуре,  $\{F_s\}$  — общий вектор сил в узлах конечно-элементной сетки «смоченной» поверхности, обусловленный давлением жидкости.

Таким образом, выражение (1) можно записать в виде:

$$J_{st} = \frac{1}{2} \{U\}^T [K] \{U\} - \frac{\omega^2}{2} \{U\}^T [M] \{U\} - \{U\}^T \{F_v\} - \{U\}^T \{F_s\}, \quad (47)$$

где  $\{U\}$  — глобальный вектор перемещений в узлах конечно-элементной сетки.

Условие экстремума функционала (12) приводит к следующему уравнению

$$([K] - \omega^2 [M]) \{U\} = \{F_v\} + \{F_s\}. \quad (48)$$

В работах [4-6] на основе прямой формулировки метода граничных элементов показано, что связь векторов давления  $\{P\}$  и нормальных скоростей  $\{V_n\}$  в узлах гранично-элементной сетки (на «смоченной» поверхности) можно записать в виде

$$[E] \{P\} = [C] \{V_n\}, \quad (49)$$

где  $[E]$  и  $[C]$  «жидкие» матрицы, зависящие от частоты. Перейдя к нормальным смещениям  $\{U_n\}$  в узлах, и, ведя обозначение  $[C_0] = \frac{1}{i\omega\rho} [C]$

получаем следующее уравнение:

$$[E] \{P\} + \rho\omega^2 [C_0] \{U_n\} = 0. \quad (50)$$

Необходимо связать переменные уравнения (14)  $\{U\}$  и  $\{F_s\}$  с переменными  $\{P\}$  и  $\{U_n\}$  уравнения (16). Предположим, что в каждом узле конечно-элементной сетки «смоченной» поверхности нам известны матрица направляющих косинусов нормалей  $[G]$  и диагональная матрица  $[A]$  приведенных площадей конечных элементов к узловым координатам, которые можно вычислить используя аппарат функций форм конечных элементов. Тогда можно получить искомую связь переменных:

$$\begin{cases} \{F_s\} = -[G][A]\{P\} \\ \{U_n\} = [G]^T \{U\} \end{cases}.$$

Таким образом, для (14) и (15) получается следующая система уравнений:

$$\begin{bmatrix} [K] - \omega^2 [M] & [G][A] \\ \rho\omega^2 [C_0][G]^T & [E] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U\} \\ \{P\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_v\} \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (51)$$

Система уравнений (17) получилась несимметричной, плотно заполненной и зависящей от частоты.

В уравнениях (17) неизвестные описывают структуру в физических координатах. Во многих случаях предпочтительней использование модальных координат для описания структуры. Это позволяет уменьшить число неизвестных решаемой задачи. Собственные частоты и формы колебаний для решения задачи в модальных координатах определяются в конечно-элементном анализе «сухой» конструкции с последующей передачей из программы конечно-элементного анализа базы данных посредством интерфейса в гранично-элементный модуль.

Будем искать решение для вектора  $\{U\}$  в виде суперпозиции собственных форм структуры:

$$\{U\} = [\Psi] \{\alpha\}, \quad (52)$$

где  $\{\Psi\}$  — матрица собственных форм,  $\{\alpha\}$  — вектор коэффициентов вклада собственных форм. Тогда система уравнений (17) запишется в виде:

$$\begin{bmatrix} ([K] - \omega^2 [M])[\Psi] & [G][A] \\ \rho\omega^2 [C_0][G]^T [\Psi] & [E] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\alpha\} \\ \{P\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_v\} \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (53)$$

Обычно собственные векторы нормируются на матрицу масс, т.е.  $[\Psi]^T [M] [\Psi] = [I]$ , где  $[I]$  — единичная матрица, и  $[\Psi]^T [K] [\Psi] = [\bar{K}]$ , где  $[\bar{K}]$  — диагональная матрица квадратов собственных частот. Следовательно, умножив первое уравнение на  $[\Psi]^T$ , получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{bmatrix} [\bar{K}] - i\omega [\bar{D}] - \omega^2 [I] & [\Psi]^T [G][A] \\ \rho\omega^2 [C_0][G]^T [\Psi] & [E] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\alpha\} \\ \{P\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\bar{F}_v\} \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (54)$$

где  $\{\bar{F}_v\} = [\Psi]^T \{F_v\}$ . В системе (20), также введена матрица модального демпфирования  $[\bar{D}] = \text{diag}(2\zeta_k \omega_k)$ , где  $\zeta_k$  — коэффициент модального демпфирования моды  $k$  с собственной частотой  $\omega_k$ .

Размерность системы (20) есть  $N + f$ , где  $f$  — количество узлов смоченной поверхности,  $N$  — количество собственных частот структуры. Размерность же системы (17)  $s + f$ , где  $s$  — количество степеней свободы структуры. Обычно  $N \gg s$ , поэтому размерность системы (20) значительно меньше размерности системы (17).

После решения системы уравнений (17) или (20) поле в любой точке рассматриваемой области может быть вычислено простыми квадратурами на основе дискретизации интегрального представления Гельмгольца, как это было продемонстрировано в работе [3].

Таким образом, приведено построение математических моделей для системы «структура — среда» на базе совместного метода конечных и граничных элементов в прямой формулировке с применением аппарата функций форм. Общие системы уравнений (17) и (20) получены как в физических так и в модальных координатах. Общая матрица разрешающей системы уравнений, как и в импедансной прямой формулировке, является несимметричной и плотнозаполненной.

## 2. Алгоритм расчета собственных частот и форм колебаний погруженной структуры

Полученные системы уравнений (17), (20) для прямой формулировки позволяют выполнить лишь приближенную оценку собственных частот

и форм колебаний конструкции, погруженной в среду, поскольку алгоритмы для полной проблемы собственных значений и собственных векторов разработаны лишь для частных случаев.

Положим в системе уравнений (17)  $\{F_v\} = 0$ .

Из второго уравнения системы можно записать:

$$\{P\} = -\rho\omega^2 [E]^{-1} [C_0] [G]^T \{U\}. \quad (55)$$

Подставляя (21) в первое уравнение (17), получаем:

$$([K] - \omega^2 ([M] + [M_a(\omega)])) \{U\} = 0, \quad (56)$$

где

$$[M_a(\omega)] = \rho [G] [A] [E]^{-1} [C_0] [G]^T. \quad (57)$$

Матрица  $[M_a(\omega)]$  называется матрицей присоединенных масс. Следует отметить, что матрица  $[M_a(\omega)]$  комплексная («жидкие» матрицы  $[E]$  и  $[C_0]$  — комплексны) и зависит от частоты. Поэтому в общем случае (22) трансцендентное уравнение относительно  $\omega$ . Для его решения можно поступить следующим образом: вычислим  $[M_a(\omega_0)]$  для определенной частоты  $\omega_0$  и решим проблему нахождения собственных частот из уравнения:

$$([K] - \omega^2 ([M] + [M_a(\omega_0)])) \{U\} = 0, \quad (58)$$

Можно считать, что в области низких частот матрица  $[M_a(\omega)]$  слабо зависит от частоты, поэтому после решения обобщенной задачи на собственные значения (24) мы получим некоторую оценку собственных форм и частот погруженной конструкции.

Уравнение (22) справедливо и тогда, когда конструкция описывается модальным базисом. В этом случае мы получаем следующую обобщенную задачу на собственные значения (см. систему уравнений (20)):

$$([\bar{K}] - \omega^2 ([\bar{I}] + [\bar{M}_a(\omega_0)])) \{\alpha\} = 0, \quad (59)$$

где

$$[\bar{M}_a(\omega)] = \rho [\Psi]^T [G] [A] [E]^{-1} [C_0] [G]^T [\Psi]. \quad (60)$$

Коэффициенты собственных векторов  $\{\alpha_k\}$  уравнения (25) есть коэффициенты участия для  $k$ -ой собственной формы колебаний конструкции. Собственные формы конструкции вычисляются по формуле (18)

Алгоритм расчета собственных частот и форм для погруженных структур основан на получении матрицы присоединенных масс среды. Эта матрица является комплексной и частотнозависимой. Её реальная часть означает собственно присоединенную массу воды в КЭ интерпретации, а мнимая часть — присоединенную жесткость акустической среды.

### 3. Решение сингулярной проблемы на характеристических частотах

На некоторых характеристических частотах «жидкие» матрицы интегрального уравнения Гельмгольца становятся сингулярными. Это приводит к невозможности получения решения на этих частотах, а в их окрестности происходит возрастание погрешности вычислений. Соответствующие этим частотам волновые числа называют характеристическими. Это означает, что на характеристических частотах системы уравнений становятся плохо обусловленными и для их решения необходимо применить некоторую процедуру регуляризации

Наиболее распространенным способом подавления погрешностей является метод комбинированных интегральных уравнений Гельмгольца, впервые предложенный Шенком [7,9]. Метод основывается на формировании дополнительных уравнений для нескольких точек, расположенных внутри или снаружи замкнутого объема. Другая группа методов основана на применении смешанных интегральных формулировок [8].

С точки зрения вычислительных затрат наиболее предпочтителен метод Шенка, который обеспечивает недорогое и эффективное решение проблемы.

Поэтому в статье предложен новый подход, основанный на совместном использовании метода комбинированных интегральных уравнений Гельмгольца и метода множителей Лагранжа, который позволяет свести переопределенную комбинированную систему уравнений к «квадратному» виду. Для этого, по аналогии с множителями Лагранжа, введем некие фиктивные переменные (или фиктивные источники наподобие узловых давлений на «смоченной» поверхности), отнесенные к точкам внутренней полости (для внешней задачи) и доопределим общую систему уравнений следующим образом:

$$\begin{bmatrix} [E] & [E']^T \\ [E'] & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P \\ \lambda \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [C] & 0 \\ [C'] & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V \\ V' \end{Bmatrix}. \quad (61)$$

Здесь  $[E]$  и  $[C]$  «жидкие» матрицы интегрального уравнения Гельмгольца для смоченной поверхности;  $[E']$  и  $[C']$  «жидкие» матрицы уравнения Гельмгольца для внутренних точек; дополнительная матрица  $[E']^T$  описывает фиктивные источники и определяет их вклад в звуковое давление для точек поверхности; матрица-столбец  $\lambda$  определяет фиктивные переменные;  $V'$  - нулевая матрица-столбец.

После преобразования совместной системы уравнений, описывающей взаимодействие «структуры-среды» получаем окончательную систему уравнений несколько большего порядка, чем число точек на смоченной поверхности. Эта окончательная система не имеет характеристических частот и обеспечивает достаточную точность решения для всех частот в рассматриваемом диапазоне.

Таким образом, разработан новый подход для подавления ошибок вблизи характеристических частот в случае контакта структуры с жидкостью как для внешней, так и для внутренней задач.

**4. Пример расчета собственных частот поворотнлопастной турбины**

Геометрия лопасти поворотнлопастной турбины приведен на рис. 2.. Так как геометрия лопасти имеет сложную форму, то для расчета собственных частот использовались квадратичные тетраэдральные элементы TET10,

Для исследования влияния закреплений модели на собственные частоты лопасти были рассмотрены три варианта расчетной схемы:

1. Полная модель лопасти с фланцем, цапфой и всеми технологическими отверстиями.

2. Лопасть с фланцем и цапфой, но без учета технологических отверстий.

3. Лопасть с отсеченной цапфой. Причем плоскость отсечения располагалась на расстоянии от плоскости соединения цапфы и фланца, как показано на рис. 3.

Параметры сеточного разбиения приведены в табл. 1.

Таблица. 1

**Параметры сеточного разбиения для вариантов расчета с элементами TET10.**

Вариант	Число узлов	Число элементов	Размер элемента
1	481848	320524	20 мм
2.	429175	286298	20 мм
3.	333938	220260	20 мм

В первом и втором вариантах расчета использовалась модель закреплений цапфы лопасти показанная на рис. 2. На двух поверхностях А (на рисунке показаны желтым цветом) в местах контакта с вкладышами подшипников корпуса рабочего колеса запрещались радиальные перемещения узлов конечно-элементной сетки. На поверхности В в месте крепления шпонками рычага лопасти к цапфе запрещались касательные (угловые) перемещения узлов конечно-элементной сетки. На поверхности С в месте крепления прижимной гайки к цапфе запрещались перемещения узлов вдоль оси вращения лопасти.

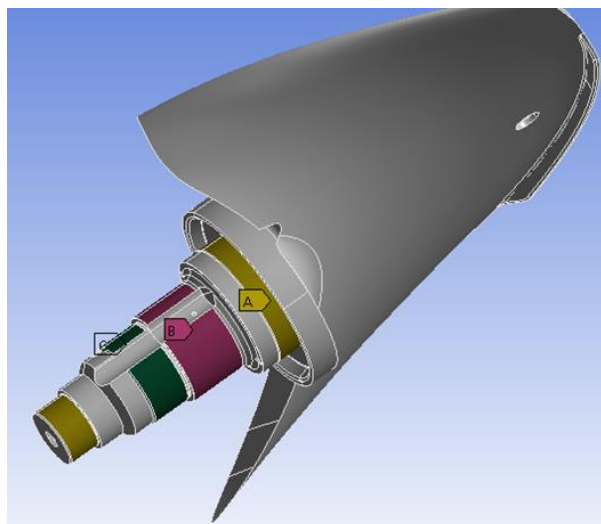


Рис. 2. Геометрия лопасти рабочего колеса и поверхности, на которых задавались условия закрепления

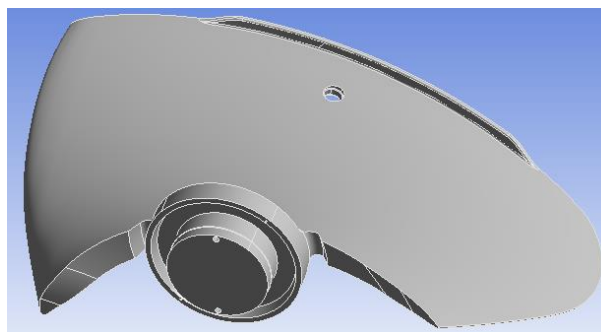


Рис. 3. Геометрия модели для третьего варианта расчетов

Для третьего варианта расчета запрещались перемещения узлов конечно-элементной сетки по трем направлениям в плоскости отсечения цапфы.

В табл. 2 приведено сравнение результатов расчета собственных частот лопасти в «воде» для первого варианта расчетов и варианта без учета цапфы. Для определения собственных частот в «воде» использовался базис из 50 «сухих» собственных частот, сеточное разбиение смоченной поверхности совпало с вариантом расчета без учета цапфы. Из таблицы видно, что отношения собственных частот в «воде» и в «воздухе» для первых трех собственных форм практически не изменились.

Таблица 2.

Результаты расчета собственных частот лопасти в «воде»

№	Вариант 2 (без учета цапфы)			Вариант 1 (с учетом цапфы)		
	«Воздух», Гц	«Вода», Гц	Отн.	«Воздух», Гц	«Вода», Гц	Отн.
1	55.0	34.5	0.63	53.1	33.0	0.62
2	82.4	53.1	0.64	76.6	49.8	0.65
3	100.7	69.1	0.69	98.6	67.9	0.69
4	150.1	108.8	0.73	121.8	107.4	0.88

5	203.6	146.3	0.75	151.7	122.2	0.81
6	212.5	193.0	0.87	206.9	150.6	0.73
7	240.8	186.2	0.77	230.6	179.9	0.78
8	267.7	211.9	0.79	255.4	190.5	0.75
9	287.7	248.9	0.81	283.5	226.5	0.80
10	305.9	214.1	0.74	296.5	220.5	0.74

Полученные результаты позволили сделать вывод об отстройке собственной частоты третьей формы колебаний от первой оборотно-лопаточной частоты возбуждения 75 Гц до значений 67- 69 Гц. Кроме этого, было выявлено, что вторая собственная частота лопасти в «воде» 49.8 Гц близка ко второй оборотно-лопастной частоте возбуждения в 50 Гц. Однако учитывая ослабленное воздействие в силу физики колебаний (второй тон собственных колебаний), на этот момент следует обращать внимание при доводочном проектировании турбины, генератора и рабочего колеса.

#### Заключение

Представлен аппарат для расчета собственных частот и форм колебаний, погруженных в жидкость структур на основе обобщенного функционала «структура-среда», позволяющий перейти

к алгоритму расчета собственных частот с учетом матриц масс и жесткости присоединенной жидкости. Разработан новый подход для подавления ошибок вблизи характеристических частот в случае контакта структуры с жидкостью, как для внешней, так и для внутренней задач. Этот подход основан на использовании метода комбинированных интегральных уравнений совместно с методом множителей Лагранжа. Физико-математические модели апробированы при проектировании поворотно-лопастной турбины, где детально рассматривались и рассчитывались, различные модели сочленения лопасти с цапфой и фланцем. В этом смысле апробированный аппарат сравнения расчетных и экспериментальных данных, представленный в статье [10] для поворотно-лопастной турбины дал дополнительные подтверждения в достоверности результатов расчета.

#### Литература

1. Золотаревич В.П., Салиенко А.Е., Фрумен А.И., Югов Н.В. Исследование собственных частот и форм колебаний лопасти рабочего колеса радиально-осевой гидротурбины на основе применения совместного метода конечных и граничных элементов. Морские интеллектуальные технологии, №2(32), Санкт-Петербург, 2016.
2. Золотаревич В.П., Салиенко А.Е., Фрумен А.И., Югов Н.В. Использование совместного метода конечных и граничных характеристик для анализа резонансных частот рабочего колеса гидротурбины. Морские интеллектуальные технологии., №2(32), Санкт-Петербург, 2016.
3. Галлагер Р. Метод конечных элементов. М.: Мир, 1984. 428 с.
4. Золотаревич В.П., Салиенко А.Е., Фрумен А.И., Югов Н.В. Применение совместного метода конечных и граничных элементов в прямой импедансной постановке к исследованию резонансных характеристик инженерных конструкций. Морские интеллектуальные технологии, №2(36), Санкт-Петербург, 2017.
5. Югов Н.В., Минин Р.А. Программный комплекс на основе МКЭ/МГЭ по расчету воздушного шума в помещениях. Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, сб.: «Средства снижения вибрации и шума. Конверсионные работы». Вып. 15, 2002.
6. Югов Н.В., Симин Н.О. Программный комплекс по расчету акустических полей корпусов судов. Труды второй международной конференции по судостроению. Секция Е: «Физические поля судов и океана (акустика, электродинамика, магнетизм и гидрофизика), обитаемость судов». ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Санкт-Петербург, Санкт-Петербург, 1998, стр. 124-129.
7. Harry A. Schenck Improved Integral Formulation for Acoustic Radiation Problems. J. Acoustic Soc. America, 1968.Vol. 44. P.41-58.
8. A. J. BURTON, G. R. MILLER, "The application of integral equation methods to the numerical of some exterior boundary-value problems", Proc. R. Soc. London, Ser. A 323, 201-210, 1971.
9. Harry A. Schenck Improved Integral Formulation for Acoustic Radiation Problems. J. Acoustic Soc. America, 1968.Vol. 44. P.41-58.
10. Золотаревич В.П., Салиенко А.Е., Фрумен А.И., Югов Н.В. Сравнительный анализ численных решений в совместном методе конечных и граничных элементов с экспериментальными данными для гидромашин и некоторыми аналитическими приближениями. Морские интеллектуальные технологии, №2(36), Санкт-Петербург, 2017.

#### References

1. Zolotarevich V.P., Salienco A.E., Frumen A.I., Yugov N.V. Issledovanie sobstvennykh chastot i form kolebaniy lopasti rabocheho kolesa radial'no-osevoy gidroturbiny na osnove primeneniya sovmestnogo metoda konechnykh i



- granichnykh elementov. Morskie intellektual'nye tekhnologii (Study of natural frequencies and mode shapes of the blade of the runner francis turbine on the basis of application coupled bem-fem methods, Marine intelligent technologies) №2(32), Saint Petersburg, 2016.
2. Zolotarevich V.P., Salienco A.E., Frumen A.I., Yugov N.V. Ispol'zovanie sovmestnogo metoda konechnykh i granichnykh kharakteristik dlya analiza rezonansnykh chastot rabocheho koleasa gidroturbiny. Morskie intellektual'nye tekhnologii (Use of coupled boundary and finite elements method for analysis of resonance frequencies of runner of hydroturbine, Marine intelligent technologies) №2(32), Saint Petersburg, 2016.
3. Gallager R. Metod konechnykh elementov (Finite Element Method). M.: Mir, 1984. 428 s.
4. Zolotarevich V.P., Salienco A.E., Frumen A.I., Yugov N.V. Primenenie sovmestnogo metoda konechnykh i granichnykh elementov v pryamoy impedansnoy postanovke k issledovaniyu rezonansnykh kharakteristik inzhenernykh konstruksiy. Morskie intellektual'nye tekhnologii, (Use of the copled finite and boundary elements method in direct impedance formulation to the study of the resonant characteristics of engineering constructions, Marine intelligent technologies) №2(36), Sankt-Peterburg, 2017.
5. Yugov N.V., Minin R.A. Programmnyy kompleks na osnove MKE/MGE po raschetu vozdušnogo shuma v pomeshcheniyakh. Trudy TsNII im. akad. A. N. Krylova, sb.: "Sredstva snizheniya vibratsii i shuma. Konversionnye raboty". Vyp. 15, 2002.
6. Yugov N.V., Simin N.O. Programmnyy kompleks po raschetu akusticheskikh poley korpusov sudov. Trudy vtoroy mezhdunarodnoy konferentsii po sudostroeniyu. Sektsiya E: "Fizicheskie polya sudov i okeana (akustika, elektrodinamika, magnetizm i gidrofizika), obitaemost' sudov". TsNII im. akad. A.N. Krylova. Sankt-Peterburg, Sankt-Peterburg, 1998, str. 124-129.
7. Harry A. Schenck Improved Integral Formulation for Acoustic Radiation Problems. J. Acoustic Soc. America, 1968.Vol. 44. P.41-58.
8. A. J. BURTON, G. R. MILLER, "The application of integral equation methods to the numerical of some exterior boundary-value problems", Proc. R. Soc. London, Ser. A 323, 201-210, 1971.
9. Harry A. Schenck Improved Integral Formulation for Acoustic Radiation Problems. J. Acoustic Soc. America, 1968.Vol. 44. P.41-58.
10. Zolotarevich V.P., Salienco A.E., Frumen A.I., Yugov N.V. Sravnitel'nyy analiz chislennykh resheniy v sovmestnom metode konechnykh i granichnykh elementov s eksperimental'nymi dannymi dlya gidromashin i nekotorymi analiticheskimi priblizheniyami. Morskie intellektual'nye tekhnologii, (comparative analysis of numerical solutions to the coupled boundary and finite elements method with experimental data for hydraulic machines and some of the analytical approximations, Marine intelligent technologies) №2(36), Sankt-Peterburg, 2017.



## 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** (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"

**Николай Васильевич Никитин**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования судов  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 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»

**Nikolay Vasilevich Nikitin**

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 *self-made* 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](http://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 обще-

принятые в международном научном общении сокращения. В переводе названия недопустимы 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 camera 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 открывает 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.

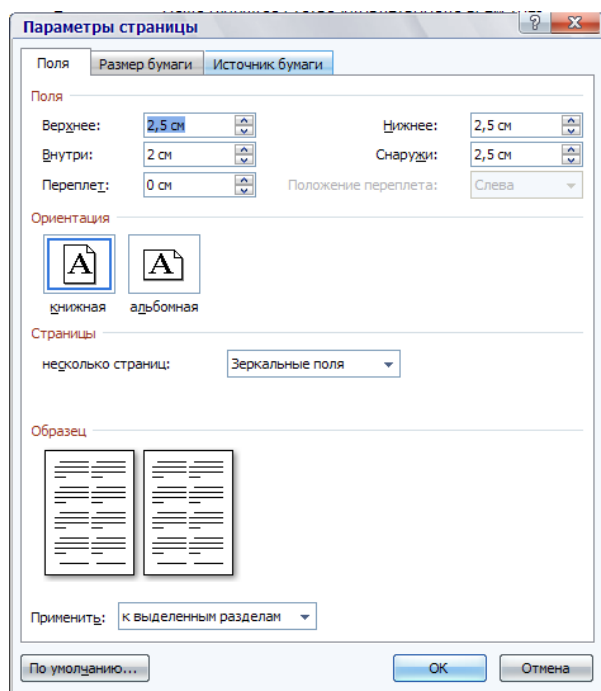


Рис. 1. Общий Layout страницы

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..
- Заголовок работы.
- Для каждого автора статье:

В оставшейся части настоящей инструкции последовательно обсуждаются все основные 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 camera 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).

#### Имя Отчество Фамилия

ученое звание, ученая степень,

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 нумерованный раздел **Благодарности**, где, как правило, указываются спонсоры (например, номер гранта РФФИ) данной работы.

– Список использованных источников, собранных в нумерованном разделе **Литература** – После списка литературы размещается список литературы в романском алфавите в нумерованном 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 подрисуночных 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>1</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.

<sup>1</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.

3.2. Использование таблиц

В работе допускается использование таблиц, подготовленных стандартными средствами MS 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).

$$\forall x \in [a, b] F(x) \leq \infty \quad (1)$$

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.

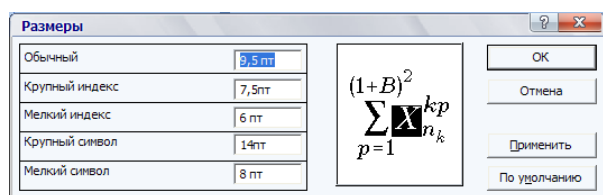
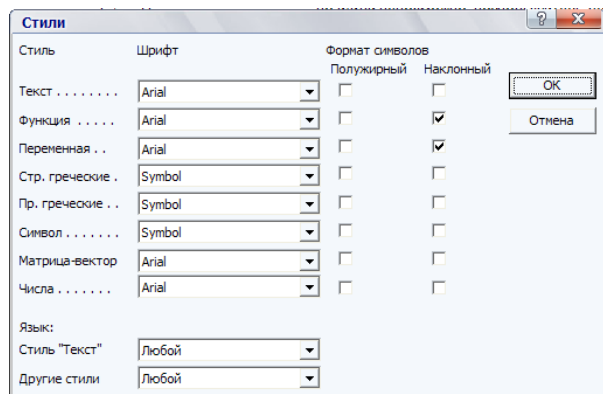


Рис. 2. Установки шрифтов и размеров в MS Equation

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:

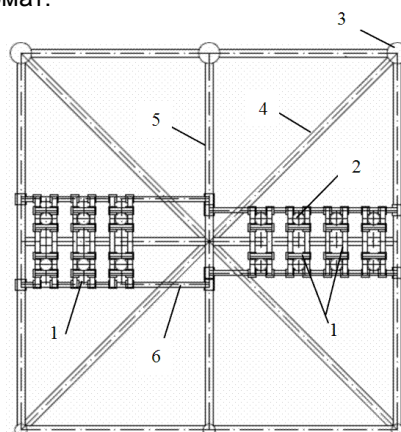


Рис. 3. Раскрепление водоотделяющих колонн с помощью жестких рам (виде плане на диафрагму МСП): 1 – жесткие рамы; 2 – водоотделяющие колонны; 3 – вертикальные стойки опорного блока; 4 – раскосы опорного блока; 5 – распорка опорного блока; 6 – фундамент жесткой рамы

### 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., Sveshnikov 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 отчетности, 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**