

4 Hz | 10 Hz | 170 Hz | 340 Hz | 679 Hz | 1.3 kHz | 2.6 kHz | 5.1 kHz | 10.1 kHz | 20 kHz

# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

10011010011011111001010011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010001010101  
00110101101100111000100111001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010  
10010001111001101111001010011011100110010100011010100110011001010101100010100100101011110100110  
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100  
0011010100110100100001011010010101000100100001111100110011001101101011001110000001110010100101  
11011100110010101111001010101001010011010011100010110010100110010101111001010111100101101001010  
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001  
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100  
00101001110011010011110001010010101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010

№ 1 (43) Т.1 2019



## Труды

Санкт-Петербургского государственного  
морского технического университета



# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 1 (43) Т.1 2019 [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)

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

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

## Главный редактор:

**Н.В. Никитин, д.т.н., профессор**

## Редакционный Совет

### Сопредседатели

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

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

### Члены Совета

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

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

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

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

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

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

Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия

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

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

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

## Редакционная коллегия

### Заместители главного редактора

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

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

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

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

### Члены Редколлегии

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

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

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

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

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

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

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

Ф.Ф. Легуша, д.ф.-м. н, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

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

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

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

Периодичность издания — 4 номера в год

Журнал включен в систему Российского индекса

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

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

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

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

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

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

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

Телефон/факс +7 (812) 513-04-51

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

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

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

Редакционная этика журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

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

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ»

Дизайн: А.В. Антонов

Верстка: А.И. Соломонова



# MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 1 (43) V.1 2019 www.morintex.ru ISSN 2073-7173, ISSN 2588-0233

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

## Chief Editor:

N. V. Nikitin, Doctor of Engineering, Professor

## Editorial Board

### Co-chairmen

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

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

## Council Members

E.M. Appolonov, Doctor of Engineering, General Director, Lazurit Central Design Bureau JSC

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, Executive Director, 51 CCIS

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

## Editorial Staff

### Deputy Chief Editors

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

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

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

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

### Members of Editorial Staff

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

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

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

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

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

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

F.F. Legusha, Dr. Sci.Phys.-Math., professor, State marine technical university of Saint-Petersburg

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

190121, Russian Federation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Design: A.V. Antonov

Page-proofs: A.I. Solomonova



**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
<b>ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА</b>	
<b>Манухин В.А., Коршунов В.А.</b> О расчетах устойчивости палубных перекрытий.....	11
<b>Борисов Р.В., Лузянин А.А.</b> Предложения по корректировке сил давления ветра при нормировании остойчивости судов.....	16
<b>Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А.</b> Исследование прогрессирующего разрушения в композиционных конструкциях корпуса судна в динамических условиях нагружения.....	22
<b>Зин Мин Хтет, Рождественский К.В.</b> Математическое моделирование судна, движимого энергией волн.....	32
<b>Рождественский К.В.</b> Исследование нестационарного обтекания закругленной передней кромки крылового профиля.....	39
<b>Рождественский К.В.</b> Математический модуль машущего крыла для задач моделирования судов, движимых энергией волн.....	46
<b>ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА</b>	
<b>Герман Г.В.</b> Анализ укрупнённого и детального нормирования работ в судостроении и судовом машиностроении.....	52
<b>Герман Г.В.</b> Новые методологические подходы в получении оценок показателей и параметров производственных и технологических процессов в судостроении.....	59
<b>Герман Г.В., Герасимов Н.И.</b> Обоснование укрупнённого достоверного нормирования работ в судостроении.....	65
<b>Фирсова А.В., Хмара Д.С.</b> Выявление, анализ и пути решения проблемных вопросов при определении трудоемкости и формировании цены на продукцию и услуги судостроительных предприятий.....	72
<b>Абрамов А.В., Фирсова А.В., Хмара Д.С.</b> Пути развития информационного пространства отрасли в целях экспертно-аналитического обеспечения разработки нормативно-методической документации.....	78
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)</b>	
<b>Аполлова А.В., Иванов Р.А., Игнатъева Е.С., Кожемякин В.В.</b> Расчетно-теоретическое исследование конструктивных характеристик забортного теплообменного аппарата.....	83
<b>Медведев В.В., Туркин И.И., Тихомиров Б.А., Голубев Р.О.</b> Анализ целесообразности повышения энергетической эффективности СЭУ с двухтопливными МОД посредством систем глубокой утилизации теплоты.....	88
<b>Медведев В.В., Жуков В.А., Туркин И.И., Голубев Р.О.</b> Анализ целесообразности применения валогенераторов в составе СЭУ СПГ-танкеров с главными двухтопливными МОД посредством систем глубокой утилизации теплоты.....	96
<b>Губанов Ю.А., Калинин И.М., Корнев А.С., Кузнецов В.И., Сеньков А.П.</b> Направления совершенствования судовых единых электроэнергетических систем.....	103
<b>Медведев В.В., Половинкин В.Н., Гаврилов В.В.</b> Краткий обзор и анализ примеров имитационного моделирования двигателей внутреннего сгорания.....	110
<b>Жуков В.А., Половинкин В.Н., Медведев В.В., Пуляев А.А.</b> Исследование процесса теплообмена в высокотемпературных системах охлаждения судовых дизелей.....	117
<b>Воршевский Ю.А., Клигцевич В.Ю., Корнев А.С., Михайлов В.М., Сеньков А.П.</b> Защита от возгорания вентильных электрических машин при междувитковых замыканиях.....	125
<b>Медведев В.В., Тихомиров Б.А., Калинин И. М., Губанов Ю. А.</b> Исследования и разработки ученых СПбГМТУ в области судовых энергетических установок и электротехнических комплексов и систем.....	130
<b>Хруцкий О.В.</b> Оценка эксплуатационной надежности энергомеханической системы на основе прогноза коэффициента готовности.....	136

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

<b>Лукьянов В.Д., Носова Л.В., Богородский А.В., Никущенко Д.В., Островский Д.Б.</b> Приближённое решение задачи Штурма-Лиувилля со сложными граничными условиями.....	142
<b>Шарфарец Б.П., Лебедев Г.А., Пыхов Д.С., Сергеев В.А., Сетин А.И.</b> Акустический преобразователь, построенный на использовании электрокинетических явлений.....	147
<b>Шарфарец Б.П., Горин С.В., Майоров В.С., Лукьянов В.Д., Сетин А.И.</b> Система уравнений электрогидродинамики для расчёта электроакустического преобразователя нового типа.....	153
<b>Щеголихин В.П., Горин С.В., Маслов В.Л., Никущенко Д.В., Сетин А.И.</b> О возможности определения остаточного акустического ресурса корабельных механизмов.....	159
<b>Щеголихин В.П., Горин С.В., Майоров В.С., Никущенко Д.В., Сетин А.И.</b> Алгоритм выявления источников повышенной виброактивности в энергетических отсеках корабля.....	163
<b>Васильев Б.П., Разрезова К.В., Горин С.В., Лебедев Г.А., Сетин А.И.</b> Термоакустические источники звука – термофоны: расчёт, проектирование, перспективы применения.....	167
<b>Лукьянов В.Д., Носова Л.В., Будрин С.В., Маслов В.Л., Никущенко Д.В., Филимонов А.К.</b> Входной импеданс периодического набора поршневых излучателей с акустическими резонаторами в жёстком экране.....	173

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ (ПО ОТРАСЛЯМ)**

<b>Воронина М.М., Евсеев В.И.</b> Концепция системы дистанционного наблюдения и контроля в задачах информационного обеспечения Морского Флота России. Исследования и практическая реализация.....	180
---	-----

**УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

<b>Андерсон Г.В., Орлов П.М., Сидоров В.М., Сиек Ю.Л.</b> Структура информационно-измерительной системы буксировочной тележки для модельных испытаний в опытовом бассейне.....	185
--	-----

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ**

<b>Агафонов А.М., Воршевский А.А., Воршевский П.А., Гришаков Е.С., Губанов Ю.А.</b> Электромагнитная совместимость систем интеллектуального управления в условиях воздействия электростатических разрядов.....	192
<b>Туркин И.И., Медведев В.В.</b> Адаптивное управление с элементами искусственного интеллекта теплообменными аппаратами.....	197

**УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

<b>Голованова О.В., Солдатов А.В., Солдатов А.А.</b> Социологическая служба университета как инструмент управления в судостроительном образовании.....	204
--	-----

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

<b>Кадыров С.Г., Певзнер В.В.</b> Первая основная задача динамики линейной вязкой сжимаемой жидкости.....	210
---	-----

CONTENTS	page
About journal .....	10
<b>THEORY OF SHIP AND STRUCTURES</b>	
<b>Vadim A. Manukhin, Vladimir A. Korshunov</b> About ship's deck buckling calculation.....	11
<b>Rudolf V. Borisov, Aleksandr A. Luzyanin</b> proposals for correction of forces of wind pressure when normalizing the stability of ships.....	16
<b>Vladimir A. Korshunov, Dmitry A. Ponomarev, Alexander A. Rodionov</b> Study of progressive damage of composite hull structures under dynamic loading conditions.....	22
<b>Zin Min Htet, Kirill V. Rozhdestvensky</b> Mathematical modeling of wave-powered ships.....	32
<b>Kirill V. Rozhdestvensky</b> Study of unsteady flow around a rounded leading edge of a wing foil.....	39
<b>Kirill V. Rozhdestvensky</b> Mathematical modeling of a flapping foil for modeling of wave-powered ships	46
<b>SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION</b>	
<b>Galina V. German</b> Usage analysis and detailed regulation works in shipbuilding and marine engineering	52
<b>Galina V. German</b> New methodological approaches in the estimates and parameters for production and technological processes in shipbuilding.....	59
<b>Galina V. German, Nikolay I. Gerasimov</b> Rationale for the fair usage rationing works in shipbuilding.....	65
<b>Anna V. Firsova, Dmitriy S. Khmara</b> Identification, analysis and solutions of problematic issues in the determination of labor input and the pricing of products and services to shipyards.....	72
<b>Alexey V. Abramov, Anna V. Firsova, Dmitriy S. Khmara</b> The development of an information space industry with the aim of the expert-analytical support of development of normative-methodical documentation.....	78
<b>SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)</b>	
<b>Anastasia V. Apollova, Roman A. Ivanov, Ekaterina S. Ignateva, Vyacheslav V. Kozhemyakin</b> Computational and theoretical research of constructive characteristics of the outboard heat exchanger....	83
<b>Valery V. Medvedev, Igor I. Turkin, Boris A. Tikhomirov, Roman O. Golubev</b> Energy effectiveness increasing expediency analysis of marine propulsion installation with dual-fuel low speed engines by means of deep heat utilization system.....	88
<b>Valery V. Medvedev, Vladimir A. Zhukov, Igor I. Turkin, Roman O. Golubev</b> Analysis of the viability of the application of shaft generators in power plants of LNG tankers with dual fuel low-speed main engines.....	96
<b>Yuriy A. Gubanov, Igor' M. Kalinin, Aleksandr S. Kornev, Viktor I. Kuznetsov, Aleksey P. Sen'kov</b> Directions of improvement for ship unified power systems.....	103
<b>Valery V. Medvedev, Valery N. Polovinkin, Vladimir V. Gavrilov</b> Brief overview and analysis of examples of imitation modeling of internal combustion engines.....	110
<b>Vladimir A. Zhukov, Valery N. Polovinkin, Valery V. Medvedev, Andrey A. Puljaev</b> Study of process of heat exchange in the high temperature cooling systems marine diesel engines.....	117
<b>Alexander A. Worshevsky, Viacheslav U. Klintsevich, Aleksandr S. Kornev, Valery M. Mikhailov, Aleksey P. Sen'kov</b> Protection against ignition of machines with permanent magnets during inter-turn closures.....	125
<b>Valery V. Medvedev, Boris A. Tikhomirov, Igor M. Kalinin, Yuri A. Gubanov</b> Research and development of scientists of SPBGMTU in the field of ship and power plants and electrotechnical complexes and systems.....	130
<b>Oleg V. Khrutsky</b> Evaluation of operational reliability of the power-mechanical system based on the forecast availability.....	136
<b>PHYSICAL FIELDS OF SHIP, OCEAN, ATMOSPHERE AND THEIR INTERACTION</b>	
<b>Valeriy D. Lukyanov, Lyudmila V. Nosova, Alexey V. Bogorodskiy, Dmitry V. Nikushenko, Dmitry B. Ostrovsky</b> Approximative solution of the Storm Liouville problem with complicated boundary conditions...	142



<b>Boris P. Sharfarets, German A. Lebedev, Dmitrij S. Pykhov, Vladimir A. Sergeev, Alexander I. Setin</b> Acoustic transducer built on the use of elektrokinetic phenomena.....	147
<b>Boris P. Sharfarets, Sergey V. Gorin, Vasiliy. S. Mayorov, Valerij D. Lukyanov, Alexander I. Setin</b> The system of electrohydrodynamic equations for the calculation of a new type of electroacoustic transducer.....	153
<b>Valentin P. Shchegolikhin, Sergey V. Gorin, Vyacheslav L. Maslov, Dmitry V. Nikuschenko, Alexander I. Setin.</b> On the possibility of determining the residual acoustic resource of ship mechanisms.	159
<b>Valentin P. Shchegolikhin, Sergey V. Gorin, Vasily S. Mayorov, Dmitry V. Nikuschenko, Alexander I. Setin.</b> Algorithm to identify sources of increased vibroactivity in the energy compartments of the ship.....	163
<b>Boris P. Vasilev, Kseniya V. Razrezova, Sergey V. Gorin, German A. Lebedev, Aleksandr I. Setin</b> Thermoacoustic sources of sound – thermophones: calculation, design, prospects of application.....	167
<b>Valery D. Lukyanov, Lyudmila V. Nosova, Sergey V. Budrin, Vyacheslav L. Maslov, Dmitry V. Nikushchenko, Anatoly K. Filimonov</b> Entrance impedance of periodic set of piston radiators with acoustic resonators in the rigid screen.....	173
<b>SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION HANDLING (IN BRANCHES)</b>	
<b>Margarita M. Voronina, Vladimir I. Evseev</b> Remote observation and control system concept in the Russian Marine information support tasks. Researches and practical implementation.....	180
<b>CONTROL AND PROCESSING OF INFORMATION</b>	
<b>Gennadiy V. Anderson, Pavel M. Orlov, Vitaliy M. Sidorov, Yuri L. Siek</b> Structure information measurements system of towing carriage for model tests in test basin.....	185
<b>AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS</b>	
<b>Aleksei M. Agafonov, Alexander A. Worshevsky, Petr A. Vorshevskii, Evgeny S. Grishakov, Yuri A. Gubanov</b> Electromagnetic compatibility of intelligent control systems under electrostatic discharges.....	192
<b>Igor I. Turkin, Valery V. Medvedev</b> Adaptive management with elements of artificial intelligence of heat exchange equipment.....	197
<b>CONTROL IN SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS</b>	
<b>Oksana V. Golovanova, Aleksandr V. Soldatov, Andrei A. Soldatov</b> Sociological service as the instrument of management in the shipbuilding education.....	204
<b>FOUNDATIONS OF INFORMATION SCIENCE MATHEMATICAL MODELLING</b>	
<b>Sergey G. Kadyrov, Vitaliy V. Pevzner</b> The first basic problem of the linear dynamics of viscous compressible fluid.....	210

## О ЖУРНАЛЕ

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

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

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

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

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

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

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

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

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

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

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

## ABOUT JOURNAL

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

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

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

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

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

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

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

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

The magazine subject corresponds to the following 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

**ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА**

УДК 539.3

**О РАСЧЕТАХ УСТОЙЧИВОСТИ ПАЛУБНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ****Вадим Анатольевич Манухин**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики корабля  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: nika16@mail.ru

**Владимир Александрович Коршунов**

кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики корабля  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: vovankorshunov@yandex.ru

**Аннотация**

В работе выполнен анализ устойчивости палубного перекрытия судна при различных граничных условиях для бимсов методом П. Ф. Папковича и методом конечных элементов в балочной и балочно-пластинчатой идеализациях. Выполнено сравнение результатов расчетов устойчивости перекрытия в линейной постановке. Решена задача по исследованию закритического поведения перекрытия с учетом физической и геометрической нелинейности. Определены критические сжимающие напряжения перекрытия. Результаты аналитических и численных расчетов сопоставлены между собой. Используя численный эксперимент, получена реальная диаграмма зависимости критических напряжений от эйлеровых. Делается вывод о хорошем совпадении результатов расчетов и о возможности вычисления критических напряжений по результатам линейного расчета устойчивости перекрытия методом конечных элементов с использованием полученной в статье диаграммы зависимости критических напряжений от эйлеровых.

**Ключевые слова:** устойчивость, перекрытие, эйлерово напряжение, критическая нагрузка, метод конечных элементов, диаграмма деформирования.

**REGARDING THE BUCKLING ANALYSIS OF DECK GRILLAGE****Vadim A. Manukhin**

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Structural Ship Mechanics

St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: nika16@mail.ru

**Vladimir A. Korshunov**

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Structural Ship Mechanics

St. Petersburg State Marine Technical University  
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: vovankorshunov@yandex.ru

**Abstract**

The paper presents the buckling analysis of deck grillage of a vessel at various boundary conditions for beams by the method of P. F. Papkovich and the finite element method in beam and beam-plate idealizations. Comparison of the results of the buckling analysis of deck grillage in the linear formulation was made. The problem of studying the supercritical behavior of the grillage, taking into account the physical and geometric nonlinearity was solved. The critical compressive grillage stresses have been determined. The results of analytical and numerical calculations are compared with each other. Using a numerical experiment, a real diagram of the dependence of critical stresses on Eulerian ones was obtained. The conclusion is made about the perfect compliance between the calculation results and the possibility of calculating the critical stresses from the results of a linear calculation of buckling analysis of deck grillage by the finite element method using the diagram, obtained in the paper, of the dependence of critical stresses on Eulerian.

**Keywords:** buckling analysis, grillage, Eulerian stress, critical load, finite element method, deformation diagram.

**Введение**

При проектировании и проверочных расчетах прочности судового корпуса большое внимание

уделяется вопросам обеспечения устойчивости палубных перекрытий.

При прогибе корпуса на волнении верхняя палуба в средней части корпуса судна воспринимает значительные сжимающие усилия, которые при

недостаточной жесткости продольных балок и бимсов (или полубимсов в районе вырезов под грузовые люки или шахты) могут вызвать общую потерю устойчивости всего перекрытия или его части в пределах одного или нескольких отсеков. Большие прогибы перекрытия или его части при потере устойчивости значительно снижают момент сопротивления продольных связей эквивалентного бруса при прогибе корпуса на волне и вызывают существенное увеличение напряжений в «жестких» продольных связях. Эквивалентный брус лишается при этом полностью или частично своего верхнего пояса, что обычно приводит к перелому корпуса.

В предлагаемой работе выполнены сравнительные расчеты устойчивости простейшего перекрытия при использовании традиционных расчетных моделей [1-4] и метода конечных элементов (МКЭ), позволяющего с одной стороны отказаться от ряда допущений и анализировать перекрытия любой сложности, а с другой стороны требующего «настройки» используемого программного средства.

### 1. Традиционные расчетные модели

Решение задачи об устойчивости палубных перекрытий корабля с продольной (русской) системой набора было получено И. Г. Бубновым, а затем дополнено П. Ф. Папковичем. В этом решении предполагалось, что количество одинаковых равноотстоящих друг от друга и от опорного контура продольных балок (ребер жесткости) должно быть намного больше, чем поперечных (бимсов), так же одинаковых, равноотстоящих друг от друга и от опорного контура. При этом расстояние между продольными балками считалось малым по сравнению с длиной бимсов. Все балки принимались призматическими, причем продольные балки с ошибкой в безопасную сторону считались шарнирно опертыми на поперечных переборках, а бимсы в общем случае упруго заделанными на бортах или продольных переборках. В последующие годы в ряде работ

А. А. Курдюмов получил решение задачи об устойчивости перекрытий, усиленных карлингсами и рамными бимсами. Имеются также решения задач об устойчивости перекрытий с продольными балками, расположенными на разном расстоянии друг от друга, перекрытий, подкрепленными пиллерсами [1-2]. Здесь же мы ограничимся рассмотрением традиционной задачи об устойчивости простейшего перекрытия, состоящего из большого числа одинаковых равноотстоящих продольных балок, опирающихся на одинаковые равностоящие поперечные балки.

Все расчеты устойчивости таких перекрытий (проверочные и проектировочные) сводятся к использованию следующей формулы для момента инерции бимсов  $I_{\bar{\sigma}}$ , обеспечивающих устойчивость перекрытия при заданных сжимающих напряжениях  $\sigma_x$

$$I_{\bar{\sigma}} = \left(\frac{\pi}{\mu}\right)^4 \left(\frac{L}{a}\right)^3 \frac{L}{b} i \varphi \chi_j^{max}(\lambda), \quad (1)$$

где  $\left(\frac{\pi}{\mu}\right)^4$  - коэффициент, зависящий от условий

заделки бимсов на контуре перекрытия;  $L$  - длина бимсов (ширина перекрытия);  $a$  - расстояние между бимсами;  $b$  - расстояние между продольными балками;  $i$  - момент инерции продольных балок;  $\varphi$  - коэффициент, учитывающий отступление от закона Гука на устойчивость, равный отношению критического напряжения перекрытия  $\sigma_{кр}$  к эйлерову  $\sigma_{\text{э}}$ ;  $\chi_j^{max}(\lambda)$  - максимальное значение функции, зависящей от числа бимсов  $n$ , параметра  $\lambda$ , равного отношению эйлерова напряжения перекрытия  $\sigma_{\text{э}}$  к эйлерову напряжению  $\sigma_{\text{э}}$  продольной балки длиной  $l = a$ , шарнирно опертой на абсолютно жесткие бимсы, и числа полуволн  $j$  возможной формы потери устойчивости продольных балок.

При проверочных расчетах устойчивости перекрытия для ряда задаваемых значений параметра  $\lambda$  из диапазона  $0 < \lambda \leq 1$  вычисляют правую часть выражения (1) и строят графики зависимости  $I_{\bar{\sigma}} = f(\lambda)$  для всех  $j = 1, 2, \dots, n$ . Далее для вычисленного по размерам бимса (с учетом присоединенного пояса настила толщиной  $t$ ) момента инерции  $I_{\bar{\sigma}}$  с помощью графиков по их верхней огибающей определяют число полуволн  $j$  и параметр  $\lambda$ , а по нему эйлерово, а затем критическое напряжение перекрытия. Если выполняется условие  $\sigma_{кр} \geq \sigma_x$ , то устойчивость перекрытия обеспечена. Для учета отступления от закона Гука используется стандартная диаграмма  $\sigma_{кр} = f(\sigma_{\text{э}})$  (рис.8).

В качестве примера приведем расчет устойчивости перекрытия, изображенного на рис.1. Параметры перекрытия:  $L = 6,8$  м;  $l = 12,6$  м;  $a = 2,1$  м;  $b = 0,4$  м;  $n = 5$ ;  $t = 0,01$  м; профиль бимсов - сварной тавр № 32а; профиль продольных балок - несимметричный полосоульб № 9; материал - сталь:  $E = 2 \times 10^5$  МПа; предел текучести  $\sigma_T = 240$  МПа. С учетом присоединенных поясков настила шириной 1,13 м и 0,35 м соответственно для бимсов и для продольных балок получаем  $I_{\bar{\sigma}} = 28300$  см<sup>4</sup> и  $i = 277$  см<sup>4</sup>,  $\sigma_{\text{э}} = 264$  МПа,  $\sigma_{\text{э}}/\sigma_T = 1,1\lambda$ .

Результаты расчетов приведены в таблице 1 для двух вариантов заделки бимсов на контуре: при шарнирном опирании и при полной заделке.

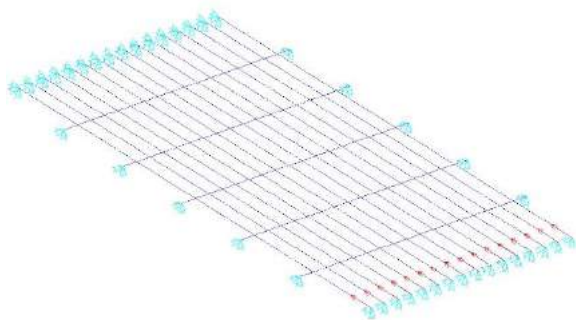


Рис. 1. Балочная модель перекрытия

Таблица 1  
Результаты аналитического расчета перекрытия

Вариант	<i>j</i>	<i>l</i>	$\sigma_z$ , МПа	$\xi$	$\sigma_{кр}$ , МПа
1	4	0,877	231	0,78	180
2	6	1,000	264	0,75	197

Формы прогиба перекрытия при потере устойчивости показаны на рис. 2 и 3.

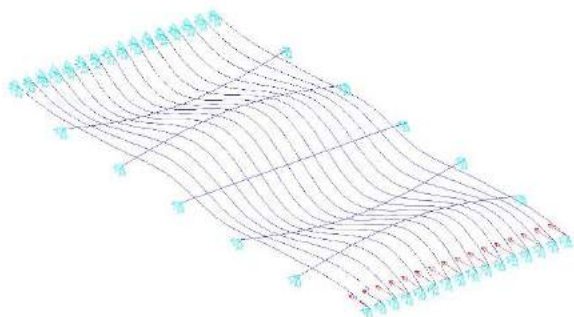


Рис. 2. Форма прогиба перекрытия при шарнирном опирании бимсов на контуре

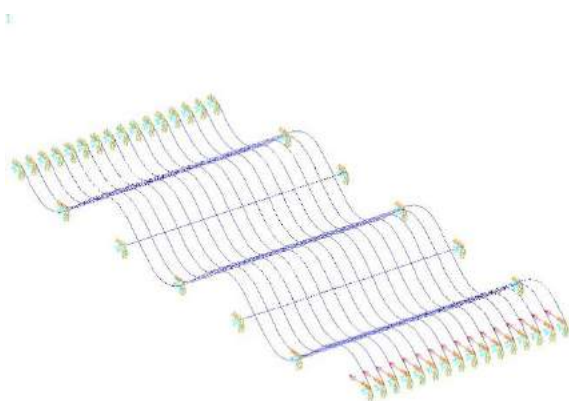


Рис. 3. Форма прогиба перекрытия при полной заделке бимсов на контуре

Из рис. 2-3 видно, что при шарнирном опирании бимсов на контуре они прогибаются, а при полной заделке бимсы ведут себя как абсолютно жесткие. Это связано с тем, что момент инерции бимсов в первом случае меньше его критического значения

$I_{кр1} = 45100 \text{ см}^4$ , а во втором случае больше  $I_{кр2} = 8800 \text{ см}^4$ . Таким образом, видно, что в первом варианте устойчивость перекрытия может быть еще повышена за счет увеличения момента инерции бимсов вплоть до его критического значения, а во втором варианте вычисленное критическое напряжение можно было обеспечить уже при  $I_{\sigma} = I_{кр2} = 8800 \text{ см}^4$ .

## 2. Конечно-элементные модели

Для рассмотренного выше перекрытия при двух вариантах заделки бимсов на контуре были проанализированы две конечно-элементные модели: 1 - балочная (рис.1) и 2 - балочно-пластинчатая (рис 4). Результаты расчетов устойчивости по МКЭ в линейной и нелинейной постановках приведены в таблице 2 и на рис. 5-7. Учитывая форму потери устойчивости перекрытия с полностью заделанными бимсами, нелинейный расчет для этого варианта выполнен только для балочной модели, включившей одно продольное ребро длиной  $l = a$ , шарнирно опертое в концевых сечениях на жесткие опоры.



Рис. 4. Балочно-пластинчатая модель перекрытия

Таблица 2  
Результаты расчета перекрытия по МКЭ

Вариант	Модель	Линейный расчет		Нелинейный расчет	
		<i>j</i>	$\sigma_z$ , МПа	<i>j</i>	$\sigma_{кр}$ , МПа
1	1	4	212	4	189
	2	4	236	4	170
2	1	6	257	6	195
	2	6	272	6	-

Из таблиц 1-2 видно, что эйлеровы напряжения по традиционной и обеим линейным моделям МКЭ для варианта 1 различаются от -8 % до +2 %, а для варианта 2 – на  $\pm 3$  %. Расхождение результатов можно объяснить учетом деформаций сдвига в балках (при исключении деформации сдвига результаты практически совпадают), внецентренным сжатием балочно-пластинчатой модели и краевого эффекта при изгибе настила у продольных кромок перекрытия. Критические напряжения по традиционной и обеим нелинейным моделям МКЭ для варианта 1 различаются на  $\pm 5$  %, а для варианта 2 – на 1 %. Расхождения можно объяснить частично теми же причинами. Однако главная причина состоит



в различном подходе к учету физической нелинейности задачи в традиционном подходе и в МКЭ.

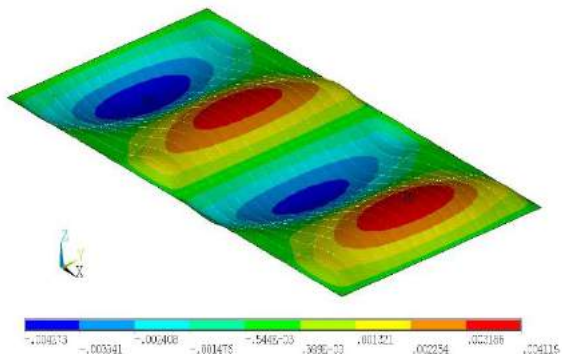


Рис. 5. Форма прогиба перекрытия при шарнирном опирании бимсов (линейный расчет МКЭ)

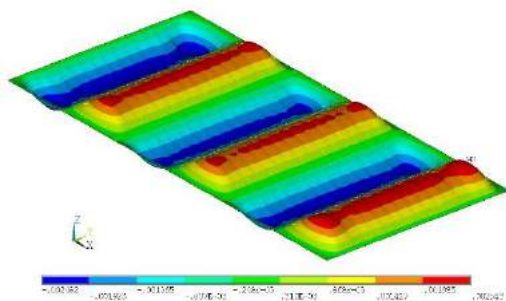


Рис. 6. Форма прогиба перекрытия при полной заделке бимсов (линейный расчет МКЭ)

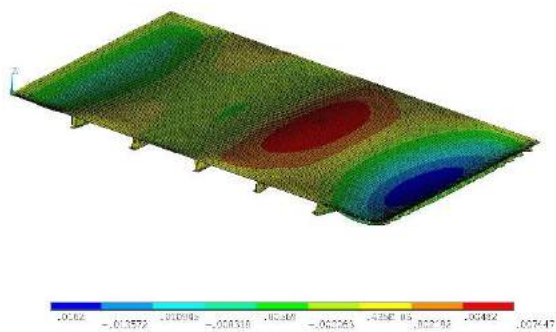


Рис. 7. Форма прогиба перекрытия при шарнирном опирании бимсов (нелинейный расчет МКЭ)

### 3. Учет упруго-пластических свойств материала

В традиционном подходе отступление от закона Гука учитывается коэффициентом  $\varphi$ , который определяется с помощью универсальной графической зависимости между эйлеровыми и критическими напряжениями, предложенной академиком Ю. А. Шиманским (рис.8).

В МКЭ при учете физической нелинейности задается диаграмма деформирования материала. Критическое напряжение определяется по максимуму зависимости  $\sigma_x = f(U_x)$ , где  $U_x$  - задаваемое продольное перемещение нагружаемой критической марки перекрытия (рис.9).

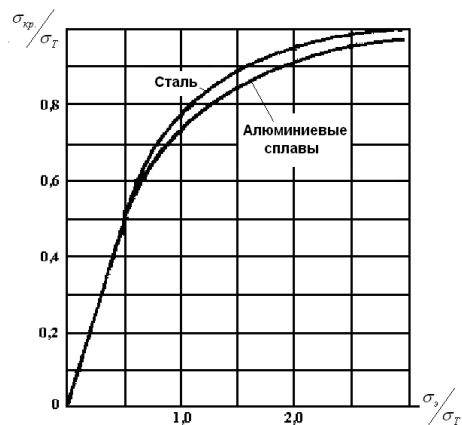


Рис. 8. Универсальная зависимость  $\sigma_{кр} = f(\sigma_y)$

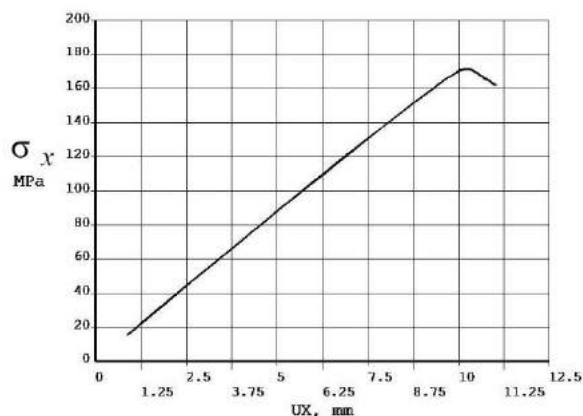


Рис. 9. Зависимость  $\sigma_x = f(U_x)$

В приведенных расчетах МКЭ задавалась диаграмма деформирования для стали марки Ст.3, имеющей, как в аналитическом расчете,  $\sigma_T = 240$  МПа (рис.10).

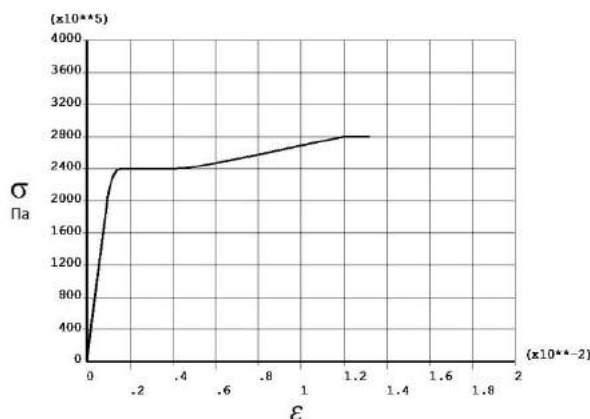


Рис. 10. Диаграмма деформирования Ст.3

В связи с этим несколько завышенные результаты вычисления критических напряжений МКЭ (см. балочную идеализацию) можно объяснить тем, что принятая в нелинейных конечно-элементных моделях Ст.3 следует закону Гука до напряжения равного  $0,8 \sigma_T$ , в то время как сталь,

соответствующая диаграмме Ю. А. Шиманского, деформируется линейно только до напряжения равного  $0,6 \sigma_T$ . Кроме того, в нелинейных моделях МКЭ учитывается и геометрическая нелинейность в околочритической области, которая приводит к некоторому увеличению жесткости конструкции.

Представляет интерес возможность получения диаграммы  $\sigma_{кр} = f(\sigma_0)$  средствами МКЭ при нелинейном расчете балки, материал которой соответствует диаграмме для Ст.3 на рис.10. По этой численной диаграмме можно повторить расчет критических напряжений аналитическим методом и сравнить их с приведенными выше критическими напряжениями по МКЭ. Более того, с помощью этой диаграммы можно получить критические напряжения по линейным конечно-элементным моделям и сравнить их с результатами нелинейных расчетов.

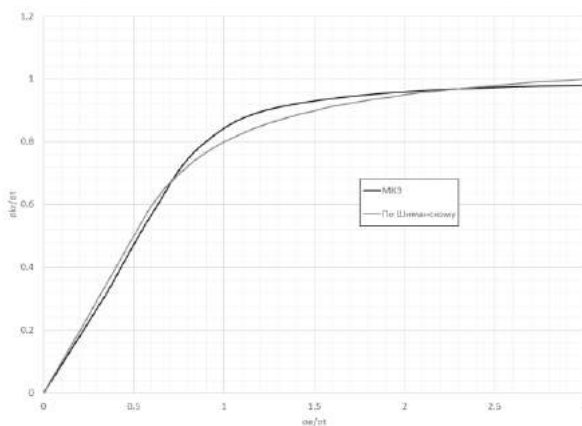


Рис. 11. Сравнение зависимостей  $\sigma_{кр} = f(\sigma_0)$ , полученных Ю. А. Шиманским и по МКЭ

В результате проведения численного эксперимента получена диаграмма  $\sigma_{кр} = f(\sigma_0)$  для двутаврового профиля (рис. 11), которая

сопоставлена с диаграммой, предложенной Ю. А. Шиманским.

По полученной диаграмме определены критические напряжения для аналитического расчета и линейного расчета по МКЭ для балочной модели. Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3  
Результаты расчета  $\sigma_{кр}$  по диаграмме  $\sigma_{кр} = f(\sigma_0)$ , полученной МКЭ

Вариант	Аналитический расчет	Линейный расчет по МКЭ	Нелинейный расчет по МКЭ
	$\sigma_{кр}$ , МПа	$\sigma_{кр}$ , МПа	$\sigma_{кр}$ , МПа
1	192	190	189
2	201	202	195

Видно, что применяя диаграмму  $\sigma_{кр} = f(\sigma_0)$  полученную для используемого материала и профиля балок перекрытия, критические напряжения для аналитического расчета возросли от 2% до 7%.

**Заключение**

Полученные в данной работе аналитическое и численное решения задачи об устойчивости палубных перекрытий судов с одной стороны подтверждают работоспособность традиционных балочных моделей и методик, а с другой стороны позволяют использовать более экономичные линейные конечно-элементные модели перекрытий любой сложности с последующим пересчетом эйлеровых напряжений в критические традиционным методом.

**Литература**

1. Папкович П. Ф. Труды по строительной механике корабля. Т. 4. Устойчивость стержней, перекрытий и пластин. Под ред. проф., д.т.н. В. В. Екимова. -Л.: Судпромгиз, 1962, 552 с.
2. Справочник по строительной механике корабля. В 3-х томах. Т.3. -Л.: Судпромгиз, 1960, 799 с.
3. Манухин В. А., Родионов А. А., Упырев В. М. Проверочные расчеты общей прочности судна: Учебное пособие. -СПб: СПбГМТУ, 2012, 114 с.
4. Короткин Я. И., Родионов А. А. Расчетное проектирование корпуса судна: Учебное пособие. -СПб: СПбГМТУ, 2007, 108 с.

**References**

1. Papkovich P. F. Trudy po stroitelnoy mehanike korablja. T.4. Ustoichivost stergney, perekrytiy i plastin. Pod red. prof. V. V. Ekimova. Leningrad, Sudpromgiz, 1962, 552 p.
2. Spravochnik po stroitelnoy mehanike korablja. V 3-h tomah, T.3, Leningrad, Sudpromgiz, 1960, 799 p.
3. Manukhin V. A., Rodionov A. A., Upyrev V. M. Proverochnyye raschety obshey prochnosty sudna. Uchebnoe posobie. St.Petersburg, SPbGMTU, 2012, 114 p.
4. Korotkin Y. I., Rodionov A. A. Raschetnoe proektirovanie korpusa sudna. Uchebnoe posobie. St.Petersburg, SPbGMTU, 2007, 108 p.

УДК 629.5

## ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО КОРРЕКТИРОВКЕ СИЛ ДАВЛЕНИЯ ВЕТРА ПРИ НОРМИРОВАНИИ ОСТОЙЧИВОСТИ СУДОВ

**Рудольф Васильевич Борисов**

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

**Александр Альфредович Лузянин**

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

### Аннотация

Современный критерий погоды (в ИМО Код «Остойчивость») рассчитан на предотвращение предельных накренений судна при совместном действии ветра и волн. Хотя идея физически обоснована, многие из допущений, на которых основан критерий, находятся в стадии обсуждения в ИМО в рамках пересмотра кода «Остойчивость неповрежденного судна».

В действующем критерии характеры качки и ветра, в основном, детерминированные.

Сейчас разрабатываются методологии, учитывающие совместное действие ветра и волн с учетом их нерегулярности (стохастический подход). Используются спектры фактического ветра и волн, в которых средняя скорость ветра является связующим звеном между спектрами ветра и волн.

В настоящей статье предлагается стохастический подход, который позволяет, в принципе, производить оценку безопасности конкретного судна в конкретных условиях плавания.

**Ключевые слова:** остойчивость, нормирование остойчивости, критерий остойчивости, корректировка критерия остойчивости, ветер, давление ветра.

## PROPOSALS FOR CORRECTION OF FORCES OF WIND PRESSURE WHEN NORMALIZING THE STABILITY OF SHIPS

**Rudol'f V. Borisov**

Dr.Sci.Tech., the professor of department of theory of the ship,  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: rvborisov@mail.ru

**Aleksandr A. Luzyanin**

candidate of technical science, assistant professor of department of theory of the ship,  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: luzianin52@mail.ru

### Annotation

The modern weather criteria (IMO code "Stability") is designed to prevent the maximum inclination of the ship under the combined action of wind and waves. Although the idea is physically justified, many of the assumptions on which the criterion is based are under discussion in the IMO as part of the revision of the "Intact Ship Stability" code.

In the current criteria, the characters of rolling and wind are mostly deterministic.

Currently, methodologies are being developed that take into account the combined effect of wind and waves, taking into account their irregularity (stochastic approach). The actual wind and wave spectra are used, in which the average wind speed is the link between the wind and wave spectra.

This article proposes a stochastic approach that allows, in principle, to assess the safety of a particular ship in specific conditions of navigation.

**Key words:** stability, normalizing stability, stability criterion, correction of the stability criterion, wind, wind pressure

Остойчивость по критерию погоды  $K$  считается достаточной, если при указанном ниже условном действии ветра и волнения выполняется требование (.5), при этом:

1. судно находится под воздействием ветра постоянной скорости, направленного перпендикулярно к его диаметральной плоскости,

которому соответствует плечо ветрового кренящего момента  $l_{w1}$  (рис. 1);

2. от статического угла крена  $\theta_0$ , вызванного постоянным ветром и соответствующего первой точке пересечения горизонтальной прямой  $l_{w1}$  и кривой восстанавливающих плеч  $l(\theta)$ , под действием волн судно кренится на наветренный борт на угол,

равный амплитуде бортовой качки  $\theta_1$  (рис. 1);

3. на наклоненное судно динамически действует порыв ветра, которому соответствует плечо кренящего момента  $l_{w2}=1,5 l_{w1}$ ;

4. вычисляются и сравниваются площади  $a$  и  $b$ , заштрихованные на рис. 1. Площадь  $b$  ограничена кривой  $l(\theta)$  восстанавливающих плеч, горизонтальной прямой, соответствующей кренящему плечу  $l_{w2}$ , и углом крена  $\theta = 50^\circ$ , либо углом крена  $\theta_c$ , соответствующим точке второго пересечения прямой  $l_{w2}$  с кривой восстанавливающих

плеч — в зависимости от того, какой из этих углов меньше. Площадь  $a$  ограничена кривой восстанавливающих плеч, прямой  $l_{w2}$  и углом крена, равным  $\theta_0 - \theta_1$ ;

5. остойчивость судна по критерию погоды  $K = b/a$  считается достаточной, если площадь  $b$  равна или больше площади  $a$ , т.е.  $K \geq 1$ .

6. статический угол крена  $\theta_0$  от действия постоянного ветра не должен превышать  $16^\circ$ , либо угла, равного 0,8 угла входа в воду кромки открытой палубы, в зависимости от того, какой из них меньше.

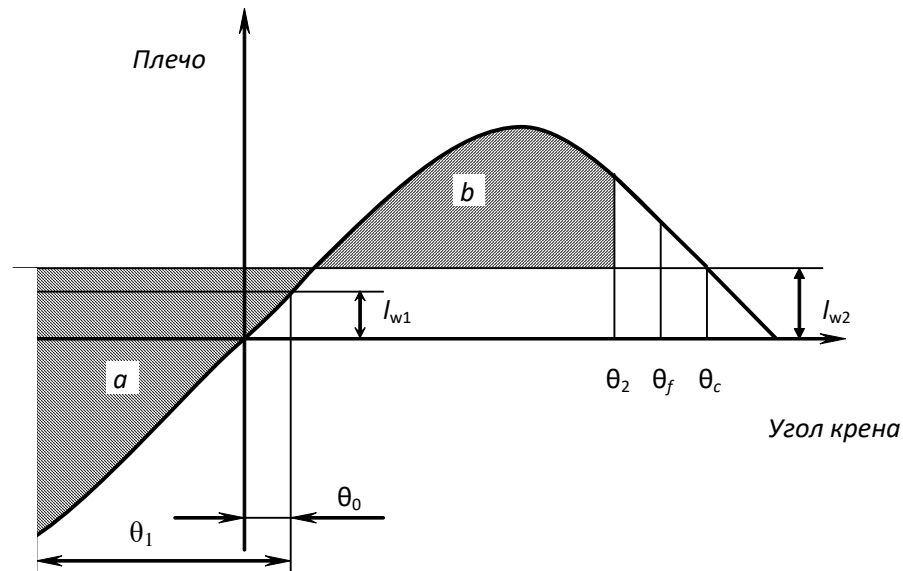


Рис. 1. Определение критерия погоды

Мы предлагаем метод определения давления постоянно дующего ветра и плеча воздействия пульсирующей ветровой нагрузки, который позволяет произвести обоснование возможности эксплуатации конкретного судна в определенном районе или рейсе с учетом конкретных ветровых условий.

**1. Действие постоянно дующего ветра**

Давление ветра  $p$ , связанное со скоростью потока  $w(t)$ , будет равно

$$p = \frac{1}{2} \rho_{\text{возд}} C_y w^2(t), \tag{1}$$

где  $\rho_{\text{возд}}$  - плотность воздуха.

Скорость ветра  $w(t)$  представляется в виде суммы средней скорости ветра  $\bar{w}$  и мгновенной  $\delta w(t)$ :

$$w(t) = \bar{w} + \delta w(t). \tag{2}$$

Если пренебречь составляющими второго порядка, на основе предположения, что коэффициент изменчивости поля ветра мал, линеаризованное выражение давления ветра получится равным

$$p(t) = p_v + \delta p(t), \tag{3}$$

где  $p_v$  - постоянное давление ветра, равное

$$p_v = \frac{1}{2} \rho_{\text{возд}} C_y \bar{w}^2; \tag{4}$$

$\delta p(t)$  – переменное давление ветра, равное

$$\delta p(t) \approx \rho_{\text{возд}} C_y \bar{w} \delta w(t). \tag{5}$$

Здесь  $C_y$  - коэффициент аэродинамического сопротивления, зависящий от наличия надстроек, развитости надводных конструкций и их формы и т.д.

Тогда горизонтальная сила от действия ветра будет равна

$$F_w(t) = F_{0w} + \delta F_w(t), \tag{6}$$

где  $F_{0w}$  - постоянная боковая сила (она же средняя)

$$F_{0w} = \frac{1}{2} \rho_{\text{возд}} \bar{w}^2 C_y A_v, \tag{7}$$

а  $\delta F_w(t)$  - переменная

$$F_w(t) \approx \rho_{\text{возд}} \bar{w} \delta w(t) C_y A_v. \tag{8}$$

В выражениях (7) и (8)  $A_v$  - площадь парусности - площадь проекций всех конструкций на диаметральною плоскость.

Постоянный кренящий момент от ветра  $M_{w1}$  можно вычислить по формуле:

$$M_{w1} = F_{0w} z_v = \frac{1}{2} C_y \rho_{\text{возд}} \bar{w}^2 A_v z_v, \tag{9}$$

где  $z_v$  — плечо парусности, м, принимаемое равным измеренному по вертикали расстоянию от центра площади парусности  $A_v$  до центра площади проекции подводной части корпуса на диаметрально плоскость, или, приближенно, до середины осадки судна.

Величина среднего ветрового момента предполагается независимой от угла крена.

Соответственно плечо кренящего момента  $l_{w1}$  будет

$$l_{w1} = \frac{M_{w1}}{\Delta}, \quad (10)$$

где  $\Delta$  - водоизмещение судна.

Кроме возможности проведения расчетов сил давления для конкретных условий плавания предложенная схема расчета позволяет внести соответствующие коррективы в существующие «Правила...».

При расчете критерия погоды в «Правилах...» плечо ветрового кренящего момента  $l_{w1}$  определяется по формуле:

$$l_{w1} = \frac{M_{w1}}{\Delta} = \frac{p_v A_v z_v}{1000 g \Delta} (\text{м}), \quad (11)$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;

$p_v$  - давление ветра, Па, которое определяется по табл. 1 в зависимости от района плавания судна.

Наравне с судами неограниченного района плавания существуют суда, предназначенные для эксплуатации только в ограниченных районах плавания. В современных «Правилах РМРС...», для них к основному символу класса добавляется один из знаков R1, R2, R2-RSN, R2-RSN(4,5), R3-RSN или R3, указывающих на соответствующие каждому знаку ограничения, приведенные ниже:

1. R1 (ранее I) - плавание в морских районах на волнении с высотой волны 3-процентной обеспеченности 8,5 м, с удалением от места убежища не более 200 миль и с допустимым расстоянием между местами убежища не более 400 миль;

2. R2 (ранее II) — плавание в морских районах на волнении с высотой волны 3-процентной обеспеченности 7,0 м, с удалением от места убежища не более 100 миль и с допустимым расстоянием между местами убежища не более 200 миль;

3. R2-RSN (ранее II СП) — смешанное (река-море) плавание на волнении с высотой волны 3-процентной обеспеченности 6,0 м, с удалением от места убежища: в открытых морях не более 50 миль и с допустимым расстоянием между местами убежища не более 100 миль; в закрытых морях не более 100 миль и с допустимым расстоянием между местами убежища не более 200 миль;

4. R2-RSN(4,5) (ранее не было) — смешанное (река-море) плавание на волнении с высотой волны 3-процентной обеспеченности 4,5 м, с удалением от места убежища: в открытых морях не более 50 миль и с допустимым расстоянием между местами убежища не более 100 миль; в закрытых морях не более 100 миль и с допустимым расстоянием между местами убежища не более 200 миль;

5. R3-RSN (ранее III СП) — смешанное (река-море) плавание на волнении с высотой волны 3-процентной обеспеченности 3,5 м, с учетом конкретных ограничений по району и условиям плавания, обусловленных ветроволновыми режимами бассейнов, с установлением при этом максимально допустимого удаления от места убежища, которое не должно превышать 50 миль;

6. R3 - портовое, рейдовое и прибрежное плавание в границах, установленных Регистром в каждом случае. Конкретные ограничения для работы плавучих кранов (выполнения грузоподъемных операций и плавания с возможной перевозкой грузов на палубе и/или в трюме) устанавливаются Регистром в каждом случае;

7. Berth-connected ship — для стоечных судов (с указанием координат места стоянки и географического района эксплуатации согласно рис. 4.3.3.6 части IV «Остойчивость»).

Конкретные ограничения по району и условиям плавания судам смешанного (река-море) плавания R3-RSN устанавливаются в виде географического названия бассейнов или их частей с указанием в необходимых случаях географической границы района плавания внутри бассейна, ограничений по удалению от места убежища и ограничений эксплуатации календарными сроками, или в виде указания рейса между конечными портами. При этом, для установления ограничений, учитывающих ветроволновые режимы бассейнов, используются данные из представляемых Регистру обоснований возможности эксплуатации судна в определенном районе или рейсе, выполненные по одобренной Регистром методике.

Таблица 1.

Давление ветра, заложенное в «Правилах...»

Район плавания судна	Давление ветра $p_v$ , Па
Неограниченный	504
Ограниченный R1	353
Ограниченный R2, R2-RSN, R2-RSN(4,5), R3-RSN	252

При таком подходе возникают следующие замечания:

- 1) давление ветра принимается одинаковым для четырех ограниченных районов плавания: R2, R2-RSN, R2-RSN(4,5) и R3-RSN;
- 2) для судов района R3 и для стоечных судов отсутствие обоснованных ограничений, учитывающих конкретные ветроволновые условия в районе эксплуатации, может привести к завышению требований к остойчивости и к увеличению расходов на эксплуатацию.

Чтобы учесть реальные условия эксплуатации предлагается значение плеча ветрового кренящего момента  $l_{w1}$  рассчитывать по формуле (11), однако среднюю скорость определять, используя статистическую зависимость, предложенную ИМО, между средней скоростью ветра и высотой волны 3% - процентной обеспеченности [ 6 ]:

$$\bar{w} = \left( \frac{h_{3\%}}{0,06717} \right)^{2/3} \text{ (м/с)}. \quad (12)$$

При рассмотрении иных условий окружающей среды по согласованию с Администрацией можно применять другие зависимости.

Высота волны  $h_{3\%}$  или задается по прогнозу волнения, или определяется из таблицы балльности (табл. 2).

Таблица 2.

**Определение высот волн 3% - ной обеспеченности**

Баллы волнения	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Высота волны $h_{3\%}$ , (м)	До 0,25	0,25-0,75	0,75-1,25	1,25-2	2-3,5	3,5-6	6-8,5	8,5-11	>11
Назначенные $h_{3\%}$ для районов плавания		0,75	1,25	2	3,5	4,5; 6,0	7,0	8,5	11
Район плавания судна		Berth-connected ship	R3	R3	R3-RSN	R2-RSN(4,5); R2-RSN	R2	R1	Неограниченный

В таблице 3 приведены рассчитанные по формуле (4) значения давления ветра для разных высот волн  $h_{3\%}$  (балльностей волнения).

Таблица 3.

**Расчетные значения давления ветра**

Район плавания судна	$h_{3\%}$ , м	$p_v$ , Па	$\bar{w}$ , м/с	$p_v = \frac{1}{2} \rho_{возд} C_y \bar{w}^2$ , Па
Berth-connected ship	0,75	–	5,0	15,3
R3	1,25	–	7,0	30,1
R3	2	–	9,6	56,4
R3-RSN	3,5	–	14,0	119
R2-RSN(4,5)	4,5	252	16,5	166
R2-RSN	6	252	20,0	244
R2	7	252	22,1	300
R1	8,5	353	25,2	388
Неограниченный	11	504	29,9	548

С учетом рассчитанных значений давления ветра можно внести корректировку в таблицу 1 (таблица 1а).

Как следует из сравнения таблиц 1 и 3, использование для расчета постоянной скорости ветра формулы (12) дает некоторое завышение значений давления ветра по сравнению с таблицей 1, поэтому предлагается, оставив для трех районов (неограниченный, R1, R2) более мягкие,

оправдавшие себя в течении многих лет, значения давления, для остальных их подкорректировать. При этом закладываются такие же смягчения, как и для неограниченного района, R1 и R2.

Для стоечных и других типов судов (доков, крановых судов и т.д.) давление ветра можно определять с использованием этой таблицы, а также с учетом формулы (12) по реальной погоде или по шестичасовому прогнозу погоды.

Таблица 1а.

**Предлагаемые значения давления ветра**

Район плавания судна	Давление ветра $p_v$ , Па
Неограниченный	504
Ограниченный R1	353
Ограниченный R2	252
Ограниченный R2-RSN	225
Ограниченный R2-RSN(4,5)	153
Ограниченный R3-RSN	109
Ограниченный R3 (IV балла волнения)	52
Ограниченный R3 (III балла волнения)	28
Berth-connected ship (I - II балла волнения)	14

**2. Плечо кренящего момента от порывистости ветра**

В действующих правилах при определении среднего плеча кренящего момента от пульсаций

ветра  $l_{w2}$  заранее закладывается допущение, что для всех судов и для всех районов эксплуатации  $l_{w2} = 1,5 l_{w1}$ .



Представим  $l_{w2}$  в виде суммы плеч от постоянно дующего ветра  $l_{w1}$  и добавки от порывистости ветра  $\delta l_{w2}$ :

$$l_{w2} = l_{w1} + \delta l_{w2}. \quad (13)$$

Переменный кренящий момент вычисляется следующим образом:

$$M_w(t) = C_y \rho_{\text{возд.}} \bar{w} \delta w(t) A_v \left( z_v - \frac{d}{2} \right). \quad (14)$$

Здесь предполагается, что изменение сил от действия порывов ветра по времени происходят быстро, так что гидродинамические реакции не успевают развиться, поэтому гидродинамическая реакция сосредоточена на ватерлинии.

Порывистость ветра, т. е. колебания скорости ветра около среднего значения  $\bar{w}$ , является нулевым средним гауссовским процессом, который можно охарактеризовать во временной/частотной области соответствующим спектром порывов  $S_w(\omega)$ . Он может принимать различные формы в зависимости от типа ветра, от средней скорости в географической зоне, от шероховатости местности и т.д. В предложенном в [6] компактном виде он приведен в выражении  $S_{\delta w}(\omega) = 4K^* \frac{\bar{w}^2}{\omega} \frac{X_D^2}{(1+X_D^2)^{\frac{4}{3}}}$ , (15)

где  $K^* = 0,003$  и  $X_D = 600 \frac{\omega}{\pi \bar{w}}$  – параметры спектра:

$\omega$  – частота колебаний.

Максимальное значение  $\delta w_M$  можно определить через дисперсию порывистости

$$\delta w_M = \delta w_{0,5\%} = 3,25 \sqrt{D_{\delta w}}, \quad (16)$$

где

$$D_{\delta w} = \int_0^{+\infty} S_{\delta w}(\omega) d\omega. \quad (17)$$

Максимальный кренящий момент от порывистого ветра будет равен

$$\delta M_w \approx \delta F_w \left( z_v - \frac{d}{2} \right) = C_y \rho_{\text{возд.}} \bar{w} \delta w_M A_v \left( z_v - \frac{d}{2} \right). \quad (18)$$

Прирост плеча кренящего момента  $\delta l_{w2}$  будет равен

$$\delta l_{w2} = \frac{\delta M_w}{\Delta} = \frac{1}{\Delta} C_y \rho_{\text{возд.}} \delta w_M A_v \left( z_v - \frac{d}{2} \right). \quad (19)$$

После подстановки выражения (16) в (19) и ряда преобразований получим

$$\delta l_{w2} = \frac{\frac{1}{2} \rho_{\text{возд.}} \bar{w}^2 C_y A_v z_v}{\Delta \bar{w}} \frac{\left( z_v - \frac{d}{2} \right)}{z_v} 6,5 \sqrt{D_{\delta w}}. \quad (20)$$

С учетом выражений (9) (10) окончательно получим:

$$\delta l_{w2} = \frac{\left( z_v - \frac{d}{2} \right)}{z_v} \frac{6,5 \sqrt{D_{\delta w}}}{\bar{w}} l_{w1}. \quad (21)$$

и

$$l_{w2} = l_{w1} + \delta l_{w2} = l_{w1} + \frac{\left( z_v - \frac{d}{2} \right)}{z_v} \frac{6,5 \sqrt{D_{\delta w}}}{\bar{w}} l_{w1} = l_{w1} \left[ 1 + \frac{\left( z_v - \frac{d}{2} \right)}{z_v} \frac{6,5 \sqrt{D_{\delta w}}}{\bar{w}} \right]. \quad (22)$$

Рассчитанные по формуле (22) значения  $l_{w2}$  использованы в таблице 4 для определения отношения  $l_{w2}/l_{w1}$ .

Таблица 4.

Отношения  $l_{w2}/l_{w1}$

Районы плавания судна	$h_{3\%}$ , м	$\delta w_M$ , м/с	$\delta p_M$ , Па	$l_{w2}/l_{w1}$
Berth-connected ship (I - II балла волнения)	0,75	1,21	23,5	1,54
R3 (III балла волнения)	1,25	1,73	46,8	1,55
R3 (IV балла волнения)	2	2,39	88,0	1,56
R3-RSN	3,5	3,5	186,1	1,56
R2-RSN(4,5)	4,5	4,11	259,5	1,56
R2-RSN	6	4,97	380,5	1,56
R2	7	5,48	466,4	1,56
R1	8,5	6,23	603,9	1,56
Неограниченный	11	7,36	850,0	1,55

Отношения  $l_{w2}/l_{w1}$  практически не зависят от  $h_{3\%}$  и очень близки к 1,5, поэтому можно для всех районов

плавания судов оставить  $l_{w2}/l_{w1}=1,5$ , как это принято в действующих «Правилах...»

### Литература

1. Луговский В.В. Теоретические основы нормирования остойчивости морских судов Ленинград. «Судостроение», 1971.
2. Благовещенский С.Н. Национальные требования к остойчивости неповрежденных судов. – В сб.: Теоретические и практические вопросы остойчивости и непотопляемости. М.–Л., «Транспорт», 1965 (Регистр СССР).
3. Севастьянов Н.Б. Основные вопросы нормирования остойчивости промысловых судов. – В сб.: Теоретические и практические вопросы остойчивости и непотопляемости. М.–Л., «Транспорт», 1965 (Регистр СССР).
4. Правила классификации и постройки морских судов. Морской регистр судоходства. Т.1, часть IV «Остойчивость», СПб, 1999.
5. Francescutto A., Serra A., Scarpa S. "A Critical Analysis of Weather Criterion for Intact Stability of Large Passenger Vessels", Proc. 20<sup>th</sup> Int. Conf. OMAE.01, Rio de Janeiro, 3-8 June 2001.

6. Davenport A. G. Spectrum of Horizontal Gustiness near the Ground in Strong Winds., Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 87, April 1961, pp. 194-211.
7. Vassalos D., Jasionowski A., Cichowicz J. Weather Criterion. Questions and Answers. Proc. STAB2003, Madrid, 2003, pp. 695-705

#### References

1. Lugovskii V.V. Teoreticheskie osnovy normirovaniya ostoichivosti morskikh sudov Leningrad. «Sudostroenie», 1971.
2. Blagoveshenskii S.N. Nacional'nye trebovaniya k ostoichivosti nepovrezhdennykh sudov. – V sb.: Teoreticheskie i prakticheskie voprosy ostoichivosti i nepotoplyaemosti. M.–L., «Transport», 1965 (Registr SSSR).
3. Sevast'yanov N.B. Osnovnye voprosy normirovaniya ostoichivosti promyslovykh sudov. – V sb.: Teoreticheskie i prakticheskie voprosy ostoichivosti i nepotoplyaemosti. M.–L., «Transport», 1965 (Registr SSSR).
4. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Morskoi registr sudohodstva. T.1, chast' IV «Ostoichivost'», SPb, 1999.
5. Francescutto A., Serra A., Scarpa S. "A Critical Analysis of Weather Criterion for Intact Stability of Large Passenger Vessels", Proc. 20<sup>th</sup> Int. Conf. OMAE.01, Rio de Janeiro, 3-8 June 2001.
6. Davenport A. G. Spectrum of Horizontal Gustiness near the Ground in Strong Winds., Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 87, April 1961, pp. 194-211.
7. Vassalos D., Jasionowski A., Cichowicz J. Weather Criterion. Questions and Answers. Proc. STAB2003, Madrid, 2003, pp. 695-705

УДК 539.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО РАЗРУШЕНИЯ В КОМПОЗИЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ КОРПУСА СУДНА В ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ

**Владимир Александрович Коршунов**

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

**Дмитрий Александрович Пономарев**

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

**Александр Александрович Родионов**

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

### Аннотация

В настоящей работе исследуются локальные повреждения в конструкциях корпуса судна катамаранного типа, изготовленного из композиционных трехслойных сэндвич-панелей. Анализ разрушения конструкций выполнен с использованием алгоритма подструктурного анализа и основывается на исследовании напряженно-деформированного состояния в каждом монослое, входящего в состав пакетов несущих слоев.

Разработаны детальные расчетные модели опасных узлов конструктивных элементов с высокой плотностью сетки конечных элементов. Выполнен нестационарный анализ с целью выявления локальных зон разрушения и анализа напряженно-деформированного состояния конструкций. Для корректного проведения динамического анализа проведен расчет на собственные частоты и формы колебаний рассматриваемой модели.

В процессе работы алгоритм подструктурного анализа получены параметры напряженно-деформированного состояния и выполнена оценка повреждений, возникающих в трехслойных панелях конструктивных элементов в составе локальной модели. Рассмотрены различные критерии разрушения.

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

## INVESTIGATION OF PROGRESSIVE FRACTURES IN COMPOSITE STRUCTURES OF A SHIP HULL UNDER THE DYNAMIC LOADING CONDITIONS

**Vladimir A. Korshunov**

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

**Dmitry A. Ponomarev**

Assistant, St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: dmitriy.smtu@gmail.com

**Aleksandr A. Rodionov**

Professor, St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: rodionovsmk@yandex.ru

### Abstract

In the present work, local damage is investigated in the hull structures of a catamaran-type vessel, made of composite 3-layer sandwich panels. Structural failure analysis was performed using a substructural analysis algorithm and is based on the study of the stress-strain state in each monolayer that is part of the base layer packages.

Detailed design models of critical structural elements assemblies with high density of finite element mesh, have been developed. A non-stationary analysis was performed in order to identify local fracture zones and analyze the stress-strain state of structures. For correct dynamic analysis, calculations were made for the eigenfrequencies and vibration modes of the model under review.

In the process of the substructural analysis algorithm, the parameters of the stress-strain state were obtained and the damage that occurred in three-layer panels of structural elements in the local model was evaluated. Various criteria for fractures were reviewed.

**Keywords:** sub-model, finite element method, substructural analysis, fracture criterion, composite material, damage

### Введение

Катамараны позволяют развивать высокую скорость даже в условиях сильного волнения, поскольку характеризуются большой остойчивостью и сниженными амплитудами качки. Катамарану свойственны значительные ударные волновые нагрузки, которые могут реализовываться в три вида слеминга: днищевой, бортовой и слеминг моста. Поэтому именно нагрузки от слеминга зачастую являются расчётными для выбора размеров связей корпуса.

Экстремальные ударные волновые нагрузки могут вызывать повреждения конструктивных элементов. Для выяснения причин зарождения и исследования особенностей прогрессирующего развития повреждений необходимо выполнять детальный анализ изменяющегося во времени напряженно-деформированного состояния. Реализовать это возможно с помощью современных численных моделей при условии одновременного анализа общего напряженно-деформированного состояния и напряженно-деформированного состояния локальных зон повреждения, что требует привлечения процедур подструктурного анализа [1]. Наибольшую актуальность подструктурный анализ приобретает применительно к задаче определения напряженно-деформированного состояния конструкции высокоскоростного катамарана, выполненной из композиционных материалов, в условиях хода на волнении [2].

На первом этапе создается конечно-элементная расчетная модель всей системы конструкции и внешней среды. Степень детализации конструкции обеспечивает выявление по результатам расчетного анализа районов корпуса с повышенными значениями параметров напряженно-деформированного состояния. Для исследования параметров состояния двухкорпусного судна - катамарана в условиях волнения применяется разработанный эффективный численный алгоритм решения задачи динамического взаимодействия деформируемых конструкций с водо-воздушной средой [3]. В результате анализа внешней гидродинамической нагрузки и напряженно-деформированного состояния всей модели конструкции определяется опасный район возможных повреждений.

Затем для выявленного опасного локального района строится подробная конечно-элементная модель, учитывающая особенности композиционного материала: последовательное формирование наружных несущих слоев и свойства легкого заполнителя. Для оценки напряженно-деформированного состояния локальной модели и выявления повреждения используется нестационарный анализ. С его помощью вычисляются изменяющиеся во времени перемещения, деформации, напряжения и силы, вызванные комбинацией статических, переходных и гармонически изменяющихся нагрузок. Масштаб

времени нагружения учитывал влияние инерции и демпфирования [4-5].

### 1. Анализ параметров состояния глобальной модели корпуса судна в экстремальных условиях эксплуатации

Конструкция корпуса исследуемого катамарана, длиной 25,7м, выполнена из полимерных композиционных материалов в виде трехслойных сэндвич-панелей, включающих в себя наружные несущие слои углепластика, между которыми располагается легкий заполнитель из пенопласта.

Расчет параметров напряженно-деформированного состояния конструкции корпуса катамарана в экстремальных условиях эксплуатации на волнении выполнен в качестве первого этапа алгоритма подструктурного анализа.

Для исследования процессов взаимодействия корпуса судна с водной и воздушной средами в условиях волнения построены совместные математические модели метода конечных элементов для корпуса катамарана, водного и воздушного бассейнов. С помощью этих моделей проведен анализ взаимодействия деформируемых конструкций корпуса катамарана с внешней средой [3]. На рисунке 1 показан расчетный вариант движения катамарана в условиях волнения при длине волны 25 м и скорости хода 30 узлов.

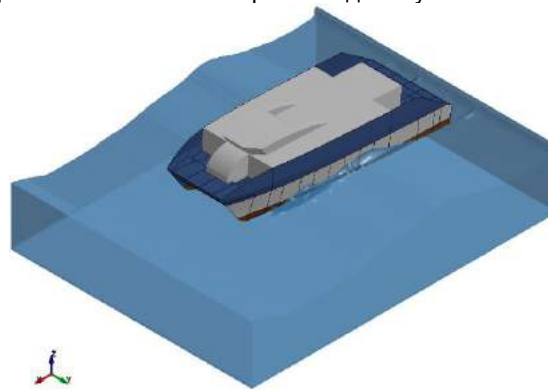


Рис. 1 Расчетный вариант движения катамарана в условиях волнения

В рамках проводимого исследования возможность деформирования корпуса катамарана обеспечивалась использованием для внешних несущих слоев и заполнителя трехслойных сэндвич-панелей ортотропной модели материала с интегральными жесткостными характеристиками.

На рисунках 2 – 5 представлены истории изменений максимальных и минимальных нормальных и касательных напряжений, возникающих в процессе деформирования элементов конструкций корпуса катамарана. Из представленных графиков видно, что в процессе динамического изгиба корпуса и колебаний трехслойных панелей конструктивных элементов, разница в растягивающих и сжимающих нормальных

напряжениях может достигать 45%. Также следует отметить, что максимальные амплитуды внутренних напряжений могут возникать в моменты времени, когда внешняя гидродинамическая нагрузка на корпус катамарана достигает своих пиковых значений. С другой стороны, период изменения напряжений соответствует периоду изменения внешней нагрузки.

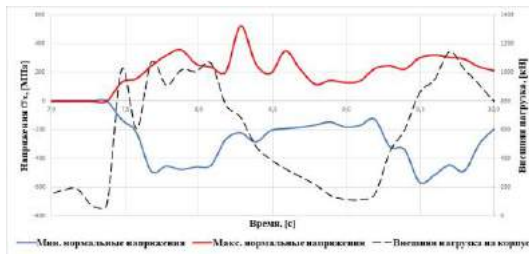


Рис. 2 Изменение нормальных напряжений  $\sigma_x$  в панелях наружной обшивки в процессе деформирования

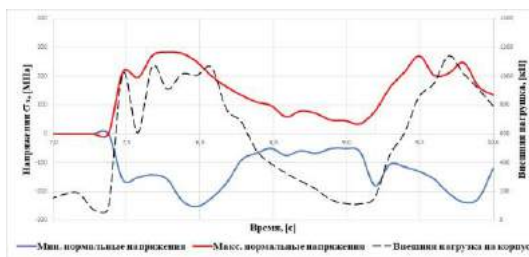


Рис. 3 Изменение нормальных напряжений  $\sigma_x$  в продольных балках набора в процессе деформирования

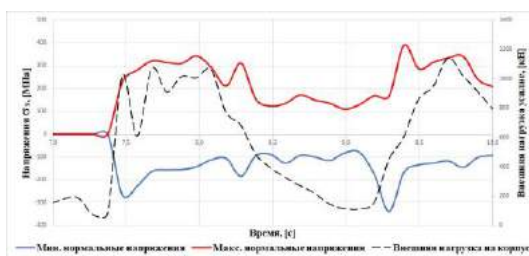


Рис. 4 Изменение нормальных напряжений  $\sigma_x$  в панелях днища в процессе деформирования

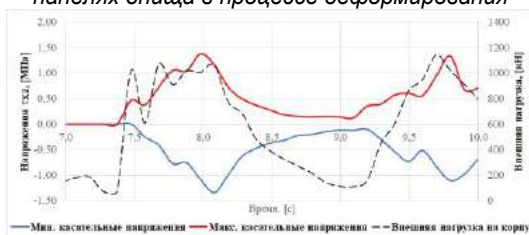


Рис. 5 Изменение касательных напряжений  $\tau_{yz}$  в панелях шпангоутов и поперечных переборок в процессе деформирования

Приведенные изменения напряжений относятся к несущим слоям и имеют интегральные значения.

Значительные гидродинамические удары в экстремальных условиях морского волнения испытывает мост катамарана, что наглядно проиллюстрировано эпюрами давлений воды в различные моменты времени (рисунки 6-8).

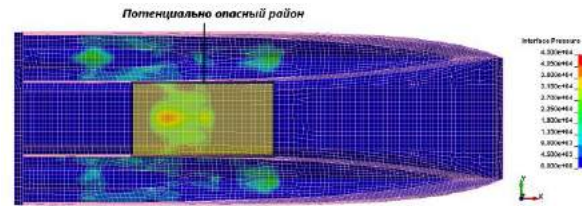


Рис. 6 Эпюра действующих гидродинамических давлений в момент времени  $t = 7.7с$

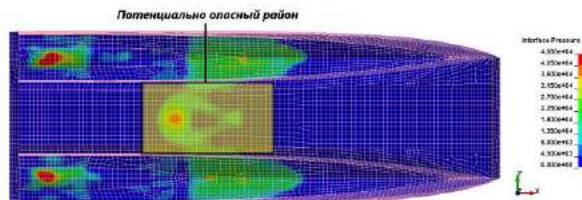


Рис. 7 Эпюра действующих гидродинамических давлений в момент времени  $t = 8.8с$

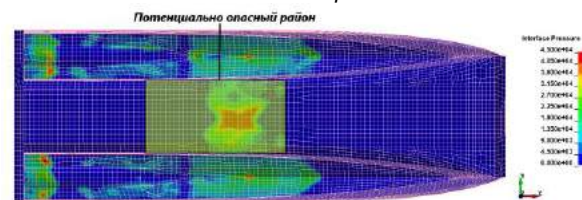


Рис. 8 Эпюра действующих гидродинамических давлений в момент времени  $t = 8.9с$

В результате анализа внешней гидродинамической нагрузки и особенностей напряженно-деформированного состояния всей модели конструкции определен потенциально опасный с позиций появления поврежденного локального района конструкции моста катамарана.

## 2. Расчетная модель локального района

Рассматриваемый наиболее нагруженный локальный район представляет собой перекрытие с одной перекрестной связью с опорным контуром, образованным поперечными переборками шпангоутов 6 и 10 и карлингсами палубы пассажирского салона (рисунок 9). Для конструкции в этом районе была построена подмодель с учетом всех особенностей конструкций, определяющих формы наступления предельных состояний. Слоистая структура несущих слоев полимерного композиционного материала моделировалась с помощью многослойных оболочечных конечных элементов с ортотропной упругопластической моделью материала. Создание расчетной сетки для несущих слоев учитывало расположение границ слоев ткани с направлением армирования (укладки). Принималось допущение об идеальной склеенности слоев между собой. Несущие слои формировались по алгоритму, который включал все основные этапы подготовки расчетной сетки, автоматическое формирование толщины несущих слоев за счет поэтапного задания монослоев в составе пакетов, что в свою очередь определяло физические характеристики материала и толщины для каждого элемента сетки [6-7].



Заполнитель моделировался твердотельными элементами, с использованием кусочно-линейной упругопластической модели материала.

В соответствии с алгоритмом формирования расчетной модели, построена локальная конечноэлементная модель, фрагмента перекрытия моста катамарана, представленная на рисунке 9.

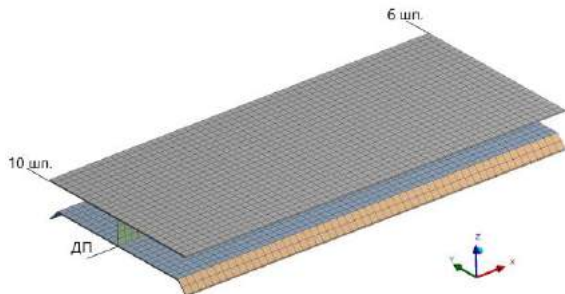


Рис. 9 Локальная конечно-элементная модель для оценки предельных состояний

В качестве материала несущих слоев использовалась углеткань. Структуры несущих слоев сэндвич-панелей различных конструктивных связей представлены на рисунках 10-12.

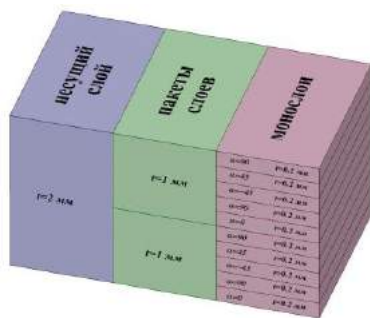


Рис. 10 Структура несущих слоев палубы и днища со стороны карлинса

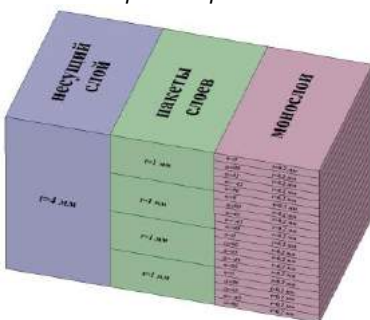


Рис. 11 Структура несущих слоев палубы и днища с внешней стороны

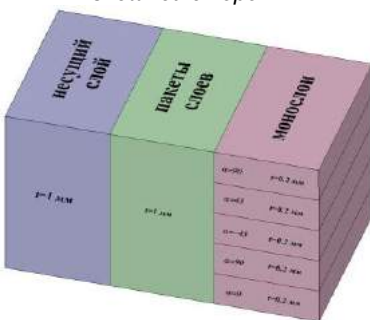


Рис. 12 Структура несущих слоев карлинса

### 3. Нестационарный анализ локальной модели

Исследования нестационарных динамических процессов, в которых участвуют деформируемые конструкции, достаточно сложны и трудоемки. Поэтому в численном моделировании важно проводить анализ на собственные частоты и формы свободных колебаний конструкции. Что необходимо для выявления особенностей динамического поведения рассматриваемой локальной модели в виде перекрытия и определения собственных частот и формы колебаний, на которые можно разложить сложное поведение системы в нестационарном процессе. Модальный анализ выполнен при кинематических граничных условиях по опорному контуру. В таблице 1 представлены значения пяти собственных частот колебаний конструкции локальной модели.

Таблица 1

Собственные частоты локальной модели

Номер частоты	Значение в Гц
1	27,39
2	50,66
3	59,73
4	65,06
5	69,73

Система дифференциальных уравнений второго порядка (1) для описания процессов деформирования конструкций в экстремальных ситуациях существенно нелинейная, причем нелинейность вызывается большими перемещениями (геометрическая нелинейность) и деформациями за пределом упругости материала (физическая нелинейность). В этих условиях использование стандартных процедур решения системы уравнений не приведет к положительному результату.

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = p \quad (1)$$

где  $M$  - матрица масс;  $C$  - матрица сопротивления;  $K$  - матрица жесткости системы,  $q, \dot{q}, \ddot{q}$  - вектора узловых перемещений, скоростей и ускорений соответственно,  $p$  - вектор узловых внешних сил.

В последнее время появились явные методы для решения уравнений типа (1). Привлекательной особенностью явного метода является рекуррентные соотношения, которые выражают перемещения, скорости и ускорения на данном шаге времени через их значения на предшествующих шагах. Основным принципом для всех конечно-разностных (или же шаговых) процедур является замена производных от перемещений в уравнении линейными комбинациями (конечными разностями) непосредственно перемещений в различные моменты времени.

Две важных проблемы конечно-разностных процедур - вопросы точности и устойчивости. Вопросы точности связаны с наличием ошибок в связи с приближенным представлением ускорений и скоростей. В случае устойчивой процедуры точность численного решения в первую очередь зависит от отношения  $\frac{\Delta t}{T}$ , где  $\Delta t$  - шаг по времени, принятый при расчете и  $T$  - период основной составляющей



внешней нагрузки. Проведение расчетов в случае действия высокочастотных нагрузок или использование шаговых процедур с низкой численной устойчивостью требуют ориентироваться на высокочастотные (с малыми периодами) колебания конструкции и, следовательно, значительно уменьшать  $\Delta t$ , что в свою очередь приводит к существенному повышению трудоемкости.

Шаг по времени должен быть достаточно малым, чтобы учесть движение (отклик) модели. Поскольку динамический отклик модели можно представить в виде комбинации собственных форм, размер шага по времени должен правильно учитывать самую высокую частоту, вносящую свой вклад в отклик модели.

Для неявной схемы интегрирования по времени известно, что использование шага интегрирования, примерно в 20 раз меньшего периода колебаний для самой высокой частоты, обеспечивает рациональную точность результата. Таким образом, если  $f$  является частотой (в колебаниях в секунду), шаг по времени для интегрирования равен

$$\Delta t = \frac{1}{20f} \quad (2)$$

Меньшее значение  $\Delta t$  может требоваться для получения результатов, связанных с ускорением. Следует обратить внимание, что наличие 20 или более шагов по времени в периоде колебаний изменяют период колебаний не более чем на 1 процент.

Нагружение локальной модели выполнено путем приложения кинематических и силовых параметров состояния, полученных из анализа напряженно-деформированного состояния глобальной модели.

Для возможности последующего обобщенного анализа внешних воздействий гидродинамические давления, изменяющиеся во времени, прикладывались в виде осредненной равномерно-распределенной нагрузки по каждому из 32 пятен нагрузки локальной конечно-элементной модели (рисунок 13). Рассматривался временной интервал, соответствующий прохождению катамарана вершины волны.

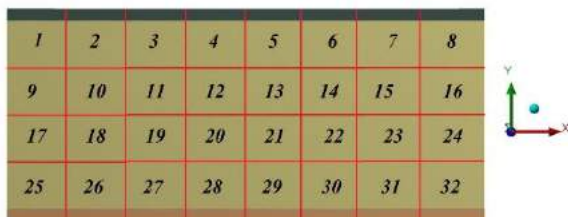


Рис. 13 Разбиение внешней панели переходного моста на пятна нагрузки

Гистограммы значений гидродинамических давлений по пятнам нагрузки с изменением во времени приведены на рисунках 14-17.

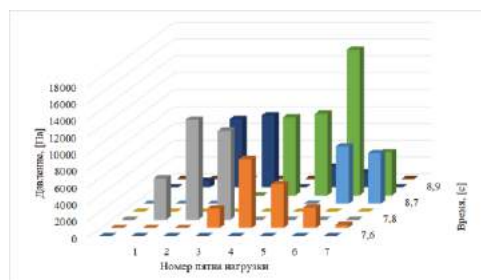


Рис. 14 Гистограмма действующих гидродинамических давлений для пятен нагрузки 1-8

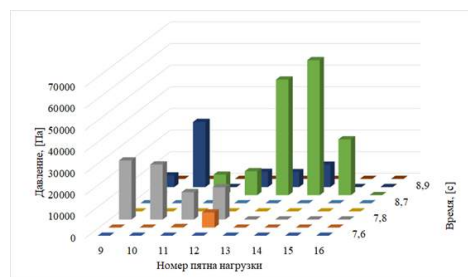


Рис. 15 Гистограмма действующих гидродинамических давлений для пятен нагрузки 9-16

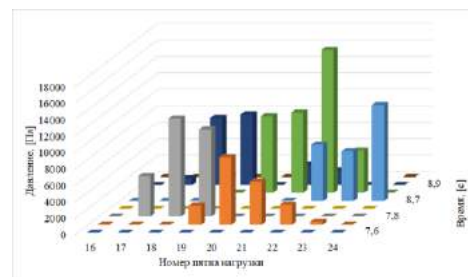


Рис. 16 Гистограмма действующих гидродинамических давлений для пятен нагрузки 17-24

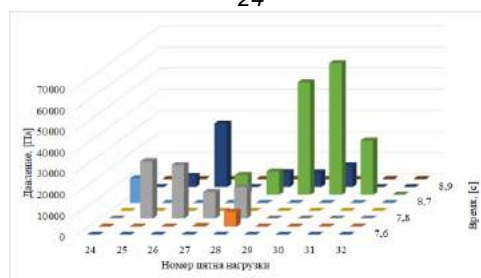


Рис. 17 Гистограмма действующих гидродинамических давлений для пятен нагрузки 25-32

В расчетных исследованиях при использовании численного интегрирования по времени для получения устойчивого решения применялись значения минимально необходимого шага по времени, зависящие от рассматриваемого диапазона частот, которые приведены в таблице 2.

Таблица 2  
Значение периода колебаний и шага по времени

Номер частоты	Период колебаний, с	Шаг по времени $\Delta t$ , с*
1	0,036	0,0018
2	0,020	0,0001
3	0,016	0,00008
4	0,015	0,000077
5	0,014	0,000072

**4. Результаты анализа напряженно-деформированного состояния и повреждений локальной модели**

В процессе работы алгоритма подструктурного анализа получены параметры напряженно-деформированного состояния и выполнена оценка повреждений, возникающих в трехслойных панелях конструктивных элементов в составе локальной модели. Установлено, что полное разрушение происходит уже на третьем шаге итерационного алгоритма.

На рисунке 18 приведена история изменения минимальных и максимальных перемещений перекрытия под действием прикладываемых нагрузок гидродинамических давлений.

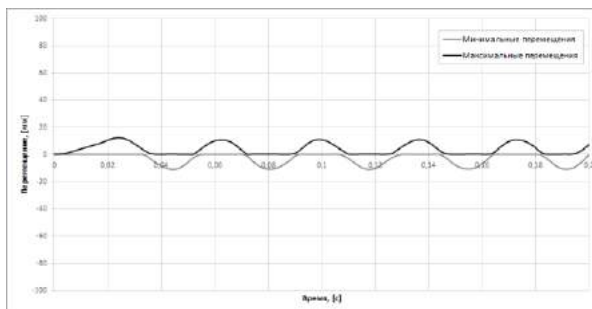


Рис. 18 Минимальные и максимальные перемещения локальной модели на первой итерации алгоритма

Для оценки повреждаемости применялись следующие критерии: критерий максимальных деформаций, критерий максимальных напряжений и критерий Тцая-Ву [8-10].

На рисунке 19 показаны монослои в составе пакетов несущих слоев, в которых инициализируются повреждения согласно критерию максимальных деформаций.

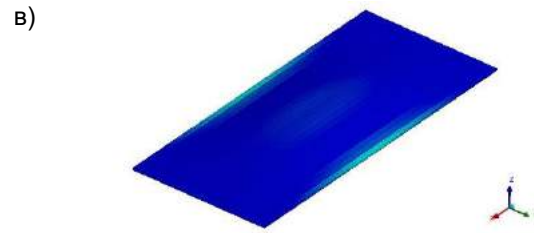
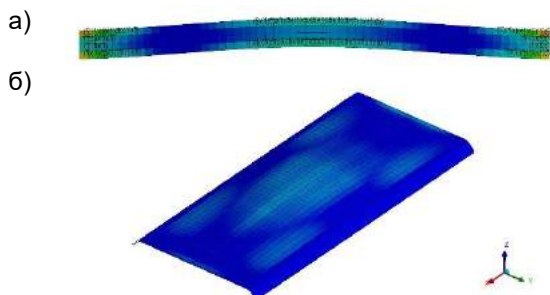


Рис. 19 Монослои, в которых инициализируются повреждения согласно критерию максимальных деформаций: а) в составе пакетов несущих слоев карлинга; б) в составе пакетов несущих слоев внешней панели моста; в) в составе пакетов несущих слоев настила палубы

На рисунке 20 представлены поля критерия максимальных напряжений, с указанием монослоя в составе пакетов несущих слоев, в котором инициализируются повреждения.

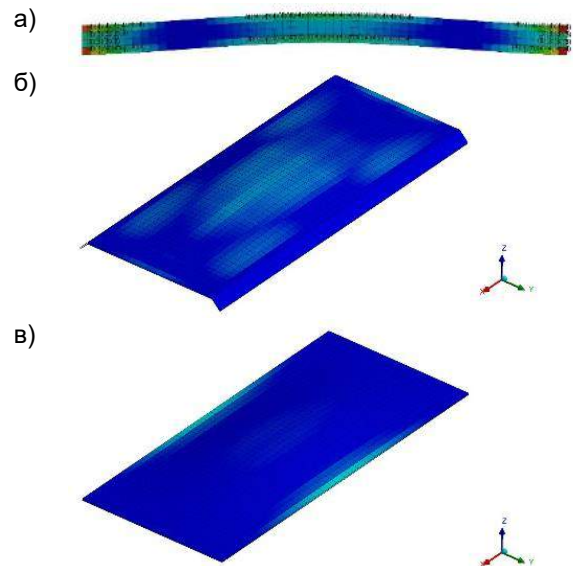
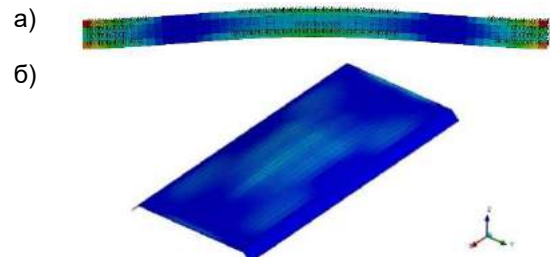


Рис. 20 Монослои, в которых инициализируются повреждения согласно критерию максимальных напряжений: а) в составе пакетов несущих слоев карлинга; б) в составе пакетов несущих слоев внешней панели моста; в) в составе пакетов несущих слоев настила палубы

На рисунке 21 изображены монослои, в которых инициализируются повреждения согласно критерию Тцая-Ву.



в)

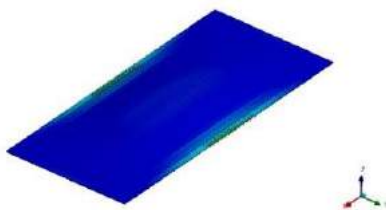


Рис. 21 Монослои, в которых инициализируются повреждения согласно критерию Тцяя-Ву: а) в составе пакетов несущих слоев карлингса; б) в составе пакетов несущих слоев внешней панели моста; в) в составе пакетов несущих слоев настила палубы

Инициализация повреждений происходит в стенке карлингса в районе опорного контура, а также в середине пролета в зонах соединения с настилом палубы и обшивкой днища. По критерию максимальных деформаций разрушение происходит в монослоях отличных от тех, в которых инициализируются повреждения согласно критерию максимальных напряжений и критерию Тцяя-Ву. В настиле палубы и обшивке днища повреждения обнаруживает только критерий Тцяя-Ву.

Из полученных результатов видно, что наиболее строгим является критерий Тцяя-Ву, согласно которому повреждения инициализируются раньше и область их распределения оказывается шире.

Для перехода ко второму шагу итерационного алгоритма, в соответствии с критерием инициирования глобального повреждения используется трехмерная версия модели деградации Линде [11]. Из деформированного состояния в случае соблюдения критерия повреждения матрицы и волокна вычисляются переменные повреждения, исходя из неповрежденного тензора упругости. Таким образом эффективный тензор упругости зависит от повреждений локальной модели. Поскольку общая модель требует свойств материала в локальных направлениях, то есть параллельной и перпендикулярной ориентации волокна, необходимо преобразование из глобального в локальное направление для ориентаций волокон, отличных от 0°. Этот процесс преобразования выполняется с помощью набора уравнений, которые обычно используются для определения общей матрицы жесткости из известных технических констант одиночных композитных слоев.

В связи с уменьшением жесткости наблюдается рост минимальных и максимальных перемещений перекрытия, рисунок 22, на второй итерации алгоритма.

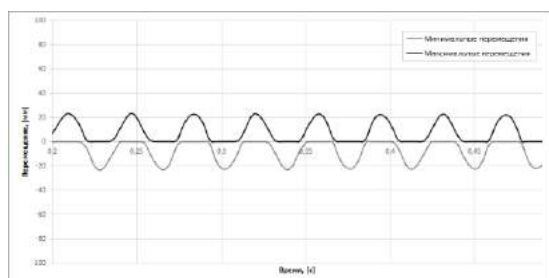


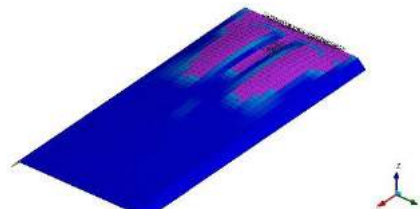
Рис. 22 Минимальные и максимальные перемещения локальной модели на первой итерации алгоритма

На рисунке 23 показаны монослои в составе пакетов несущих слоев, в которых инициализируются повреждения согласно критерию максимальных деформаций.

а)



б)



в)

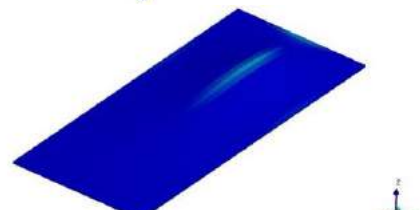


Рис. 23 Монослои, в которых инициализируются повреждения согласно критерию максимальных деформаций на второй итерации алгоритма: а) в составе пакетов несущих слоев карлингса; б) в составе пакетов несущих слоев внешней панели моста; в) в составе пакетов несущих слоев настила палубы

На рисунке 24 представлены поля критерия максимальных напряжений, с указанием монослоя в составе пакетов несущих слоев, в котором инициализируются повреждения.

а)



б)



в)

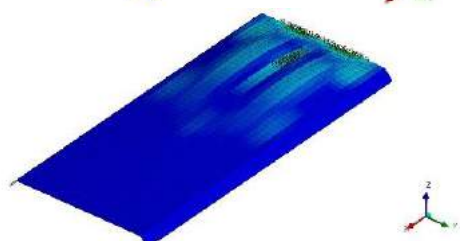


Рис. 24 Монослои, в которых инициализируются повреждения согласно критерию максимальных напряжений на второй итерации алгоритма: а) в составе пакетов несущих слоев карлингса; б) в составе пакетов несущих слоев внешней панели моста; в) в составе пакетов несущих слоев настила палубы

Монослои, в которых инициализируются повреждения согласно критерию Тцяя-Ву, показаны на рисунке 25

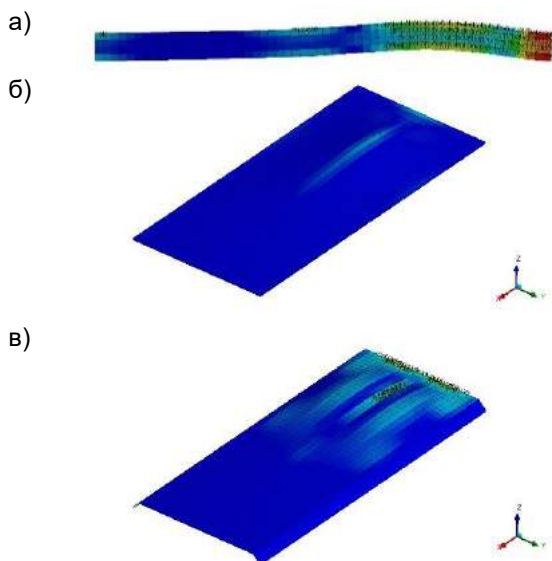


Рис. 25 Монослои, в которых инициализируются повреждения согласно критерию Тцяя-Ву на второй итерации алгоритма: а) в составе пакетов несущих слоев карлинга; б) в составе пакетов несущих слоев внешней панели моста; в) в составе пакетов несущих слоев настила палубы

Инициализация повреждений происходит в стенке карлинга в районе опорного сечения, ближайшего к кормовой оконечности, а также в конструктивных узлах соединения с настилом палубы и обшивкой днища.

Согласно критерию максимальных деформаций разрушение обнаруживается в монослоях отличных от тех, в которых инициализируются повреждения по критерию максимальных напряжений и критерию Тцяя-Ву. Критерий максимальных деформаций не обнаруживает разрушение в настиле палубы и обшивке днища. Использование критериев максимальных напряжений и Тцяя-Ву указывает на развитие повреждений, обнаруженных на предыдущей итерации.

В результате изменения жесткости районов повреждений происходит перераспределение напряжений. С учетом нестационарного процесса и вынужденных колебаний всей конструкции разрушение происходит в отличных от первой итерации областях. В связи с этим согласно используемому алгоритму, проводится снижение жесткости материала в новых зонах повреждения.

Очередное снижение жесткостных характеристик локальной модели приводит к существенному увеличению минимальных и максимальных перемещений перекрытия, что проиллюстрировано на рисунке 26.

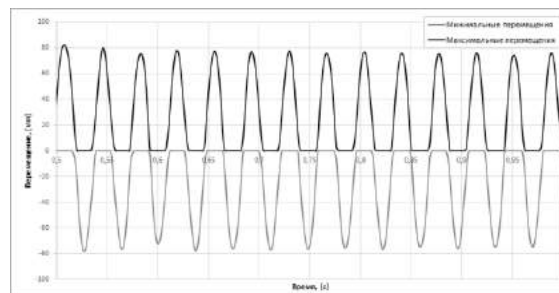


Рис. 26 Минимальные и максимальные перемещения локальной модели на первой итерации алгоритма

Инициализация повреждений по критерию максимальных деформаций в монослоях пакета несущих слоев представлена на рисунке 27.

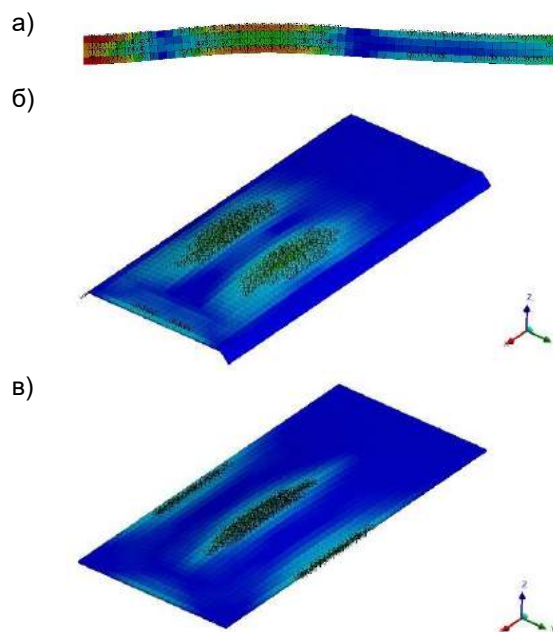


Рис. 27 Монослои, в которых инициализируются повреждения согласно критерию максимальных деформаций на третьей итерации алгоритма: а) в составе пакетов несущих слоев карлинга; б) в составе пакетов несущих слоев внешней панели моста; в) в составе пакетов несущих слоев настила палубы

На рисунке 28 показаны поля критерия максимальных напряжений, с указанием монослоя в составе пакетов несущих слоев, в котором инициализируются повреждения.

На рисунке 29 приведены поля критерия Тцяя-Ву, с указанием монослоя в составе пакетов несущих слоев, в котором инициализируются повреждения.



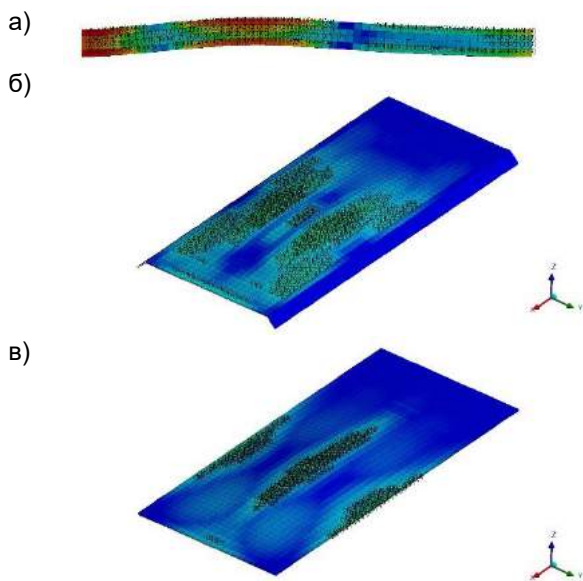


Рис. 28 Монослои, в которых инициализируются повреждения согласно критерию максимальных напряжений на третьей итерации алгоритма: а) в составе пакетов несущих слоев карлингса; б) в составе пакетов несущих слоев внешней панели моста; в) в составе пакетов несущих слоев настила палубы

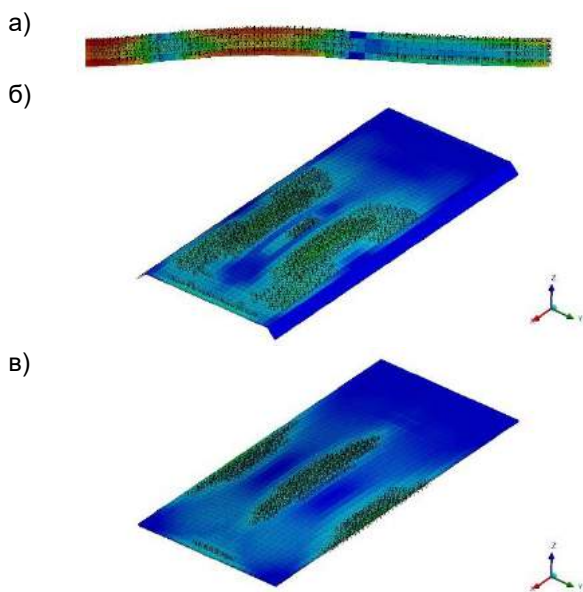


Рис. 29 Монослои, в которых инициализируются повреждения согласно критерию Тцая-Ву на третьей итерации алгоритма: а) в составе пакетов несущих слоев карлингса; б) в составе пакетов несущих слоев внешней панели моста; в) в составе пакетов несущих слоев настила палубы

На третьем шаге итерационной процедуры после снижения жесткостных характеристик локальной модели происходит практически полное разрушение стенки карлингса по всем трем критериям. Также разрушения обнаруживаются в сэндвич-панелях настила палубы, обшивки днища между карлингсом и опорным контуром. Область повреждений, по отношению к предыдущей итерации, смещается в сторону носовой оконечности.

**Заключение**

В работе выполнены исследования инициализации повреждений и прогрессирующего разрушения материала в композиционных конструкциях корпуса судна-катамарана, находящегося в динамических условиях нагружения. В качестве инструмента исследования использовались численные модели метода конечных элементов с использованием процедур подструктурного анализа.

Реализация анализа напряженно-деформированного состояния и выявление зон повреждений осуществлена с помощью нестационарного расчета, используемого для определения динамического поведения системы при действии широкого спектра зависящих от времени нагрузок.

Из анализа внешней гидродинамической нагрузки на корпус и напряженно-деформированного состояния конструкции, полученных с помощью общей конечно-элементной расчетной модели, которая объединяет в себе корпус судна и внешние водную и воздушную среды, определен район, потенциально опасный с точки зрения развития разрушений. Таким районом оказался фрагмент мостовой конструкции катамарана.

Для этого района разработана детальная расчетная модель метода конечных элементов, способная выявлять отказы в структуре монослоев полимерного композиционного материала конструкции. С целью повышения точности нестационарного анализа поведения подмодели выполнен модальный анализ и определены основные собственные частоты и соответствующие формы колебаний.

В результате расчетного исследования нестационарного процесса деформирования подмодели установлено, что первичная инициализация повреждений обнаруживается в стенке карлингса в районе опорного контура, а также в середине пролета в конструктивных узлах соединения стенки с настилом палубы и обшивкой днища. Использование критерия максимальных деформаций показывает, что разрушение происходит в монослоях, отличных от тех, в которых инициализируются повреждения в соответствии с критериями максимальных напряжений и Тцая-Ву. В настиле палубы и обшивке днища разрушения обнаруживаются только по критерию Тцая-Ву.

Снижение жесткостных характеристик локальной модели на каждой итерации алгоритма подструктурного анализа приводит к увеличению перемещений.

На последующих итерациях инициализация повреждений обнаруживается в стенке карлингса в районе опорного сечения, ближайшего к кормовой оконечности, а также в конструктивных узлах соединения с настилом палубы и обшивкой днища.

В этом случае также критерий максимальных деформаций и критерии максимальных напряжений и Тцая-Ву дают различающиеся номера монослоев, в которых обнаруживаются отказы. Согласно критерию максимальных напряжений и критерию Тцая-Ву реализуется повреждения в рассмотренных ранее районах.

После снижения жесткостных характеристик локальной модели на третьем шаге итерационной процедуры наблюдается практически полный отказ стенки карлингса по всем трем критериям. Также разрушение обнаруживается и в сэндвич-панелях настила палубы, и в обшивке днища между карлингсом и опорным контуром. Область повреждений, по отношению к предыдущей итерации, сдвигается в сторону носовой оконечности.

Следует отметить, что на первой и второй итерациях наблюдаются большие области повреждений, что в общем не означает полного исчерпания несущей способности рассматриваемой подмодели. Обнаруживаемые на третьей же итерации разрушения пакетов монослоев

значительно снижая жесткостные характеристики, приводят к большим перемещениям, перераспределению напряжений и, в конечном итоге, к полной утрате несущей способности.

Выполненный нестационарный анализ позволил учесть динамическое нагружение локальной модели с учетом особенностей процесса прохождения катамарана взволнованной водной поверхности. Предложенный алгоритм подструктурного анализа, учитывающий деградацию жесткостных характеристик материала, позволяет оценить влияние локальных зон разрушения на несущую способность основных конструкций и уточнить запасы прочности корпусных конструкций судов.

### Литература

1. Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Развитие методов подструктурного анализа для исследований локальных форм отказа корпусных конструкций из полимерных композиционных материалов. Морские Интеллектуальные Технологии, Научный журнал №4 (42) Т. 1 2018, стр. 76-82.]
2. Пономарев Д.А. Современные методы решения задачи взаимодействия конструкций с водо-воздушной средой. Морские Интеллектуальные Технологии, Научный журнал №3 (37) Т. 3 2017, стр. 30-40.
3. Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Моделирование взаимодействия деформируемой конструкции корпуса катамарана с жидкостью в условиях морского волнения. В сб. «Труды Крыловского государственного научного центра». Специальный вып.2 2018. СПб 2018.с.104-113.
4. Bathe K.J., Wilson E.L. Numerical methods in finite element analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1976г.
5. Баничук Н.В., Иванова С.Ю., Шаранюк А.В. Динамика конструкций. Анализ и оптимизация., М., Наука, 1989г.
6. Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Анализ предельных форм потери несущей способности конструктивных связей корпуса из полимерных композиционных материалов В сб. «Труды Крыловского государственного научного центра». Вып.92 (376). СПб 2016.с.9-18.
7. Сычева С.Н., Родионов А.А. Моделирование прогрессирующего разрушения деталей корпусных конструкций из полимерных композиционных материалов при столкновении с жестким препятствием
8. Гришин В.И., Дзюба А.С., Дударьков Ю.И. Прочность и устойчивость элементов и соединений авиационных конструкций из композитов. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2013. – 272 с.
9. Chang F. K., Chang K. Y. A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentration, Journal of Composite Materials, Vol. – 21, 1987, p. 834-855.
10. Tsai S. W. and Wu E. M. A general theory of strength for anisotropic materials. Journal of Composite Materials, Vol. 5, 1971, p. 58–80
11. P. Linde, J. Pleitner, H. de Boer, C. Carmone, Modelling and simulation of fibre metal laminates, in: ABAQUS Users' conference, 421-439, 2004.

### References

1. Korshunov V.A., Ponomarev D.A., Rodionov A.A. Razvitie metodov podstrukturnogo anali-za dlya issledovaniy lokal'nyh form otkaza korpusnyh konstrukcij iz polimernyh kom-pozicionnyh materialov Morskije Intellektual'nye Tekhnologii, Nauchnyj zhurnal №4 (42) T. 1 2018, str. 76-82.]
2. Ponomarev D.A. Sovremennye metody resheniya zadachi vzaimodejstviya konstrukcij s vo-do-vozdushnoj sredoj. Morskije Intellektual'nye Tekhnologii, Nauchnyj zhurnal №3 (37) T. 3 2017, str. 30-40.
3. Korshunov V.A., Ponomarev D.A., Rodionov A.A. Modelirovanie vzaimodejstviya defor-miruemoj konstrukcii korpusa katamarana s zhidkost'yu v usloviyah morskogo volneniya. V sb. «Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra». Special'nyj vyp.2 2018. SPb 2018.s.104-113.
4. Bathe K.J., Wilson E.L. Numerical methods in finite element analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1976g.
5. Banichuk N.V., Ivanova S.YU., SHaranyuk A.V. Dinamika konstrukcij. Analiz i optimizaciya., M., Nauka, 1989g.
6. Korshunov V.A., Ponomarev D.A., Rodionov A.A. Analiz predel'nyh form poteri nesushchej sposobnosti konstruktivnyh svyazej korpusa iz polimernyh kompozicionnyh materialov V sb. «Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra». Vyp.92 (376). SPb 2016.s.9-18.
7. Sycheva S.N., Rodionov A.A. Modelirovanie progressiruyushchego razrusheniya detalej kor-pusnyh konstrukcij iz polimernyh kompozicionnyh materialov pri stolknovenii s zhest-kim prepyatstviem
8. Grishin V.I., Dzyuba A.S., Dudar'kov YU.I. Prochnost' i ustojchivost' ehlementov i soedine-nij aviacionnyh konstrukcij iz kompozitov. – М.: Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury, 2013. – 272 s.
9. Chang F. K., Chang K. Y. A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentration, Journal of Composite Materials, Vol. – 21, 1987, p. 834-855.
10. Tsai S. W. and Wu E. M. A general theory of strength for anisotropic materials. Journal of Composite Materials, Vol. 5, 1971, p. 58–8
11. P. Linde, J. Pleitner, H. de Boer, C. Carmone, Modelling and simulation of fibre metal laminates, in: ABAQUS Users' conference, 421-439, 2004.

УДК 532.5.031

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУДНА, ДВИЖИМОГО ЭНЕРГИЕЙ ВОЛН

**Зин Мин Хтет**

аспирант кафедры прикладной математики и математического моделирования  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: zinmin.353828@gmail.com

**Кирилл Всеволодович Рождественский**

д.т.н., профессор  
проректор по международному сотрудничеству в области науки и образования  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: kvrxmas@yahoo.com

### Аннотация

В статье предлагается новая математическая модель судна, движимого полностью или частично за счет использования энергии волнения. При этом для преобразования волновой энергии в дополнительную тягу, на днище судна, в его оконечностях, установлены крылья большого удлинения. Продольная качка судна заданного типа, обводов и размерений на заданном регулярном волнении рассчитывается на основе совместных уравнений вертикально-килевой качки. Далее, для найденных численным методом смешанных колебаний носового и кормового крыльев, с привлечением теории Теодорсена колеблющегося профиля оценивается средняя за период колебаний комбинированная тяга крыльев. Возможность реализации движения судна за счет исключительного или частичного использования тяги крыльев, генерируемой энергией волн заданной длины, оценивается путем наложения кривых располагаемой волновой тяги и кривой сопротивления, построенных в функции от скорости. Показано, что для судна, заданных размерений возможны режимы движения исключительно за счет волновой энергии, а также режимы, для которых тяга лишь частично создается посредством энергосберегающих крыльев, а движение судна вперед возможно лишь при дополнительном применении упора гребных винтов. В ходе расчетов демонстрируется влияние на тягу удлинения и площади энергосберегающих крыльев, а также эффект реализации волновой тяги при совместном использовании носового и кормового крыльев по сравнению со случаем использования только одного (носового или кормового) крыла. Для режима движения судна исключительно за счет возобновляемой волновой энергии океана демонстрируется зависимость скорости движения судна и тяги энергосберегающих крыльев от длины волн. Полученные расчетные данные позволяют получить представление о механизме и эффективности энергосбережения с применением крыльевых устройств, преобразующих энергию волн в тягу.

**Ключевые слова:** крыльевые системы генерирования тяги за счет энергии волн, движители типа «машущее крыло», использование возобновляемой энергии океана

## MATHEMATICAL MODELING OF WAVE-POWERED SHIPS

**Zin Min Htet**

Ph.D student, Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling  
Saint-Petersburg State marine technical university  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: zinmin.353828@gmail.com

**Kirill V. Rozhdestvenskii**

D.Tech. Sc., Professor  
Vice-Rector for International Science & Education  
Saint-Petersburg State marine technical university  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: kvrxmas@yahoo.com

### Abstract

Proposed in this paper is a new mathematical model of a ship, fully or partially propelled through use of wave energy. Therewith, to convert wave energy into additional thrust there are installed on the bottom of the ship at its extremities the wings of high aspect ratio. Longitudinal motions of a ship of given type, geometry and dimensions on prescribed regular waves are determined by means of numerical solutions of coupled equations of ship pitching and heaving. Then, for numerically obtained combined motions of the bow and stern wings, time-averaged total thrust is determined with use of Theodorsen theory of oscillating foil. A possibility of realization of motion of the ship exclusively or partially by means of thrust of the wings, generated by energy of waves of given length, is evaluated by cross-plotting of available thrust curves against ship drag curve versus a speed range. It is shown that for a ship of given



dimensions, there exist modes of motion powered exclusively by wave energy and also such modes of propulsion for which the required thrust is only partially generated by waves, whereas forward motion of the ship is only possible with additional use of the thrust of screw propellers. Demonstrated in the calculations is the influence upon the wave-generated thrust of the aspect ratio and reference area of the wings, and also the effect of using simultaneously the bow and stern wings as compared to using just one (bow or stern) wing. For the case of the ship propelled purely by wave energy there are demonstrated dependencies of ship speed and wave generated thrust on the wave length. Calculated data obtained herein allows to better understand the mechanism and efficiency of energy saving with use of wing devices.

Key words: wing systems for wave-energy generated thrust, "flapping-wing" propulsors, utilization of the ocean renewable energy.

**Введение**

В последние годы Международная морская организация (ИМО) активизировала усилия по выработке экологических норм эксплуатации судов и морских сооружений. «Зеленые» суда проектируются на использование чистого топлива и различных энергосберегающих технологий, а также минимизацию вредных выбросов в морскую среду. Согласно требованию Индекса энергоэффективности ИМО (EEDI) судов, в 2025 году выбросы CO<sub>2</sub> должны быть сокращены на 30%.

В статье предложена математическая модель энергосберегающего судна, использующего для своего движения не только упор движителя (например - гребного винта), но и дополнительный упор, создаваемый на специальных носовых и/или кормовых крыльевых устройствах за счет вертикальной и килевой качки. Модель представляет собой синтез уравнений качки судна (с учетом гидродинамических сил на крыльях) с теорией машущего крыла. В результате, получены предварительные оценки возможности уменьшения энергетических затрат двигательной установки судна за счет использования возобновляемой энергии волн.

Пропульсивные свойства машущего крыла и перспективы энергосбережения посредством установки на судне крыльевых устройств рассматривались в целом ряде работ, см. [1]-[3], [7] и т.д.

В частности, в работах исследователей Норвежского университета науки и технологии (NTNU) теоретически и экспериментально оценивались амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) продольной качки и тяги для судов с носовыми и кормовыми крыльевыми устройствами.

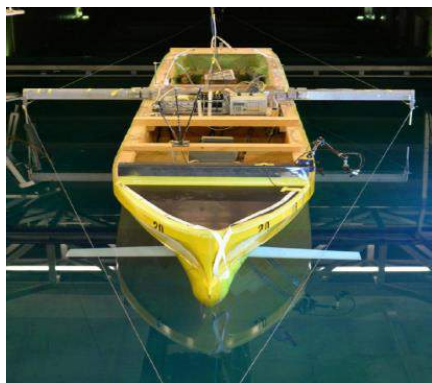


Рис 1. Испытания модели судна с крыльями в опытном бассейне NTNU, [3]

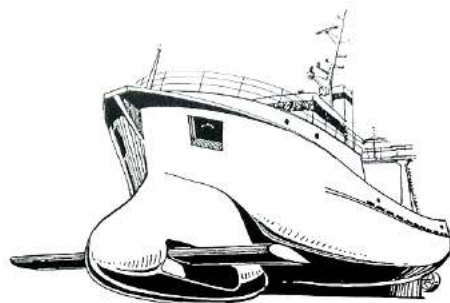


Рис 2. Российское рыболовное судно, оснащенное носовым крылом, [1]

**1. К расчёту продольной качки судна**

Используется метод поперечных сечений в частотной области. Связанные уравнения продольной качки судна, составляющими которой являются вертикальная и килевая качки, могут быть записаны в виде, [2]

$$(M + A_{33})\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + C_{33}\eta_3 + A_{35}\ddot{\eta}_5 + B_{35}\dot{\eta}_5 + C_{35}\eta_5 = F_3 e^{i\omega t} \tag{1}$$

$$A_{53}\ddot{\eta}_3 + B_{53}\dot{\eta}_3 + C_{53}\eta_3 + (I_5 + A_{55})\ddot{\eta}_5 + B_{55}\dot{\eta}_5 + C_{55}\eta_5 = F_5 e^{i\omega t} \tag{2}$$

где  $A_{ik}$  - присоединенные массы,  $B_{ik}$  - коэффициенты сопротивления;  $C_{ik}$  - коэффициенты восстанавливающих сил;  $i$  - индекс, обозначающий тот вид качки, для которого подсчитывается сила сопротивления, или мнимая единица;  $k$  - вид поступательного или вращательного движения, см. Рис 3.

$$\text{Где } A_{33} = \int a_{33} d\xi - \frac{U}{\omega_e^2} b_{33}^A \tag{3}$$

$$A_{55} = \int \xi^2 a_{33} d\xi + \frac{U}{\omega_e^2} A_{33}^0 - \frac{U}{\omega_e^2} x_A^2 b_{33}^A + \frac{U}{\omega_e^2} x_A a_{33}^A \tag{4}$$

$$A_{35} = -\int \xi a_{33} d\xi - \frac{U}{\omega_e^2} B_{33}^0 + \frac{U}{\omega_e^2} x_A^2 b_{33}^A - \frac{U^2}{\omega_e^2} a_{33}^A \tag{5}$$

$$A_{53} = -\int \zeta a_{33} d\xi + \frac{U}{\omega_e^2} B_{33}^0 + \frac{U}{\omega_e^2} x_A b_{33}^A \quad (6)$$

$$B_{33} = \int b_{33} d\xi + U a_{33}^A \quad (7)$$

$$B_{55} = \int \xi^2 b_{33} d\xi + \frac{U}{\omega_e^2} B_{33}^0 + U x_A^2 a_{33}^A + \frac{U}{\omega_e^2} x_A b_{33}^A \quad (8)$$

$$B_{35} = -\int \xi b_{33} d\xi + U A_{33}^0 - U x_A a_{33}^A - \frac{U^2}{\omega_e^2} b_{33}^A \quad (9)$$

$$B_{53} = -\int \xi b_{33} d\xi - U A_{33}^0 - U x_A a_{33}^A \quad (10)$$

$$C_{33} = \rho g \int b d\xi \quad (11)$$

$$C_{55} = \rho g \int \xi^2 b d\xi \quad (12)$$

$$C_{35} = C_{53} = -\rho g \int \xi b d\xi \quad (13)$$

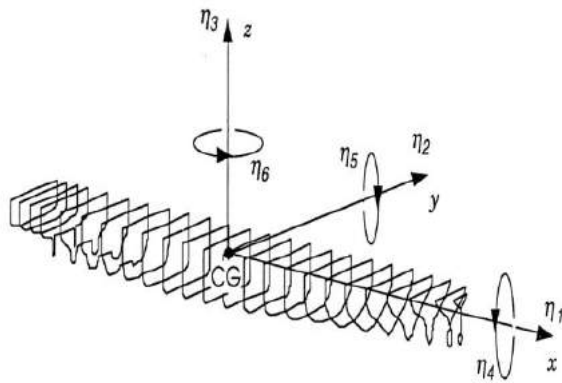


Рис 3. Система координат судна, CG - центр тяжести судна

где-  $\eta_1$  - продольно-горизонтальная качка,  
 $\eta_2$  - поперечно-горизонтальная качка,  
 $\eta_3$  - вертикальная качка,  $\eta_4$  - бортовая качка,  $\eta_5$  -  
 килевая качка,  $\eta_6$  - рысканье.

Дифракционные и возмущающие силы и моменты для встречной волны ( $\beta = 180^\circ$ , см. Рис 4) могут быть записаны в виде:

$$F_3 = \zeta_a \int e^{ik\xi} e^{-kds} \{ \rho g b - \omega_o (\omega_e a_{33} - ib_{33}) \} d\xi - \zeta_a \frac{U}{i\omega_e} e^{ikx^A} e^{-kds} \omega_o x^A (\omega_e a_{33}^A - ib_{33}^A) \quad (14)$$

$$F_5 = \zeta_a \int e^{ik\xi} e^{-kds} \left[ \xi \{ \rho g b - \omega_o (\omega_e a_{33} - ib_{33}) \} - \frac{U}{i\omega_e} \omega_o (\omega_e a_{33} - ib_{33}) \right] d\xi + \zeta_a \frac{U}{i\omega_e} e^{ikx^A} e^{-kds} \omega_o x^A (\omega_e a_{33}^A - ib_{33}^A) \quad (15)$$

где  $\zeta_a$  – амплитуда волны,  $\omega_o$  – угловая частота волны,  $\omega_e$  – кажущаяся частота,  $k$  – волновое число,  $U$  – скорость судна,  $S$  – коэффициент площади сечения,  $a_{ik}$  – двумерный размерный коэффициент присоединенной массы,  $a_{ik}^A$  – для последней секции,  $b_{ik}$  – двумерный коэффициент демпфирования сечений,  $b_{ik}^A = b_{ik}$  – для последнего сечения,  $\omega_o = \sqrt{gk}$ ,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\omega_o = \omega_e + kU \cos \beta$ .

Примем гармонические зависимости от времени для всех видов движения,

$$\eta_i = \bar{\eta}_i e^{i\omega_e t}, \dot{\eta}_i = i\omega_e \bar{\eta}_i e^{i\omega_e t}, \ddot{\eta}_i = -\omega_e^2 \bar{\eta}_i e^{i\omega_e t} \quad (16)$$

где  $\bar{\eta}_i$  – амплитуда движения, уравнение (1) и (2) принимают вид

$$-\omega_e^2 (M / I + A_{ik}) \bar{\eta}_i e^{i\omega_e t} + i\omega_e B_{ik} \bar{\eta}_i e^{i\omega_e t} + C_{ik} \bar{\eta}_i e^{i\omega_e t} = F_i e^{i\omega_e t} \quad (17)$$

Решение для амплитуды вертикальной и килевой качки имеет вид:

$$\bar{\eta}_i = \frac{F_i}{-\omega_e^2 (M / I + A_{ik}) + i\omega_e B_{ik} + C_{ik}} \quad (18)$$

$$\bar{\eta}_i = \sqrt{\bar{\eta}_{i,real}^2 + \bar{\eta}_{i,imaginary}^2} \quad (19)$$

Тангенс фазового угла определяется как

$$\varepsilon_i = \arctan \left( \frac{\bar{\eta}_{i,imaginary}}{\bar{\eta}_{i,real}} \right) \quad (20)$$

Результаты численного моделирования сопоставлялись с методом 3D-панелей [5] и экспериментальными данными [7] Комитета мореходности ИТТС, 1978 года. Приняты следующие параметры контейнеровоза L = 87,5м, В = 12,7 м, Т = 5,5м. Все расчеты были проведены для числа Фруда  $F_n = 0,275$ .

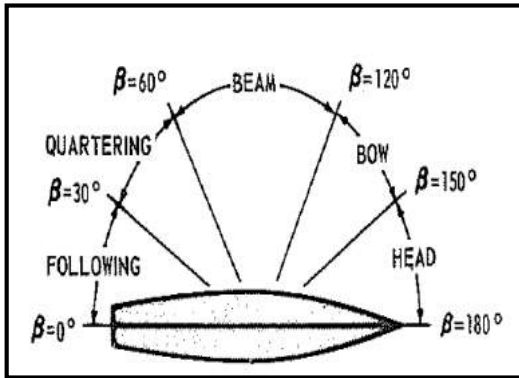


Рис 4. Определение направлений падающей волны[4]

Для изучения движения судна на регулярном волнении был выбран следующий диапазон длин волн:  $\lambda / L$  [с 0,4 до 2,5], который соответствовал экспериментальным данным. Расчеты вертикальной и килевой качки судна проведены при числе Фруда  $F_n = 0,275$  и «курсовом» угле  $\beta = 180^\circ$ .

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) вертикальной и килевой качки, полученная численным моделированием, удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными и с методом 3D-панелей. В представленных на рис. 5 и 6 графиках приняты следующие обозначения:  $\frac{\eta_3}{\zeta_a}$  - безразмерная амплитуда вертикальной качки,  $\frac{\eta_5}{k\zeta_a}$  - безразмерная амплитуда килевой качки.

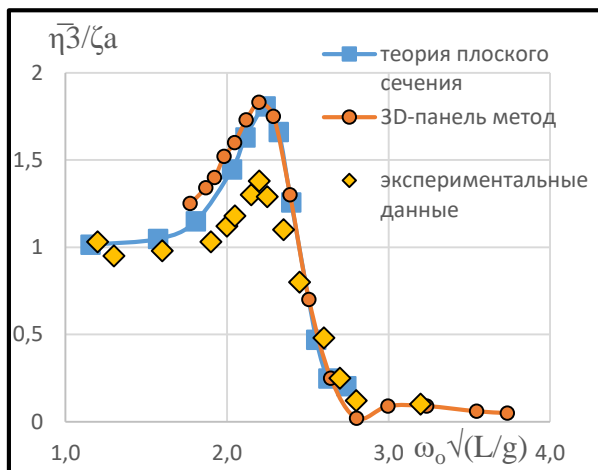


Рис 5. АЧХ вертикальной качки контейнеровоза S-175 при курсовом угле  $\beta = 180^\circ$

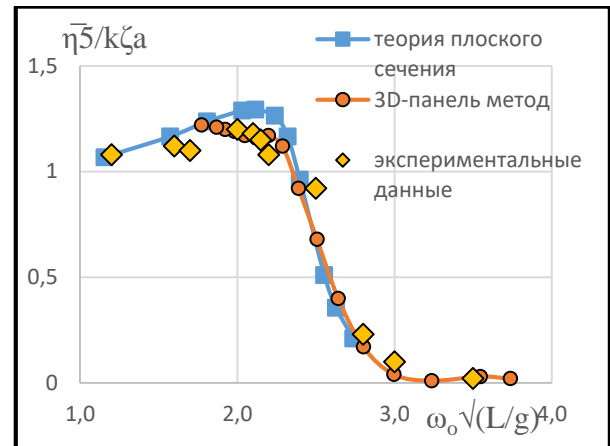


Рис 6. АЧХ килевой качки контейнеровоза S-175 при курсовом угле  $\beta = 180^\circ$ .

Характерные величины контейнеровоза приведены  $L = 87,5$  м,  $B = 12,7$  м,  $T = 5,5$  м и удлинение крыла  $s = 7,5$  м, хорда  $c = 2,5$  м.

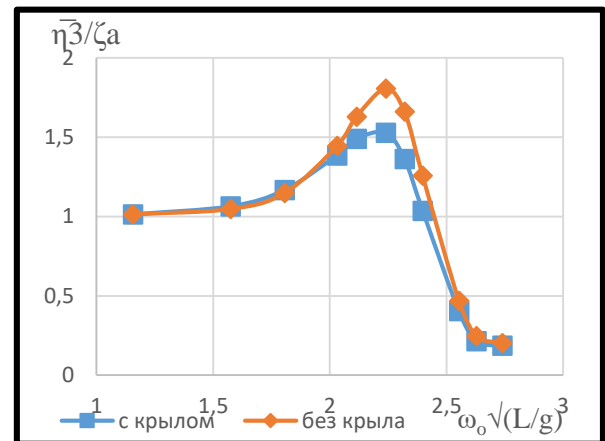


Рис 7. АЧХ вертикальной качки контейнеровоза S-175 при курсовом угле  $\beta = 180^\circ$  (крыло в носовой части судна),  $U = 15,6$  уз

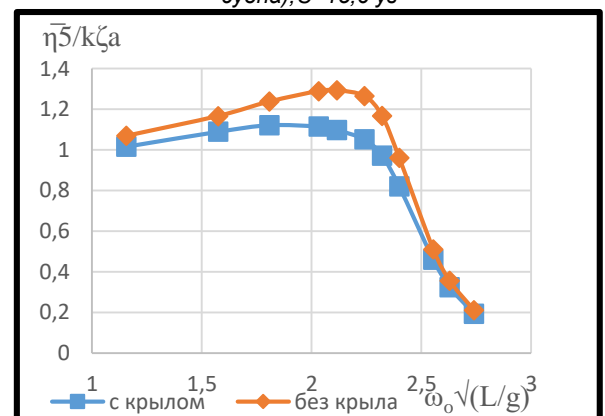


Рис 8. АЧХ килевой качки контейнеровоза S-175 при курсовом угле  $\beta = 180^\circ$  (крыло в носовой части судна),  $U = 15,6$  уз.

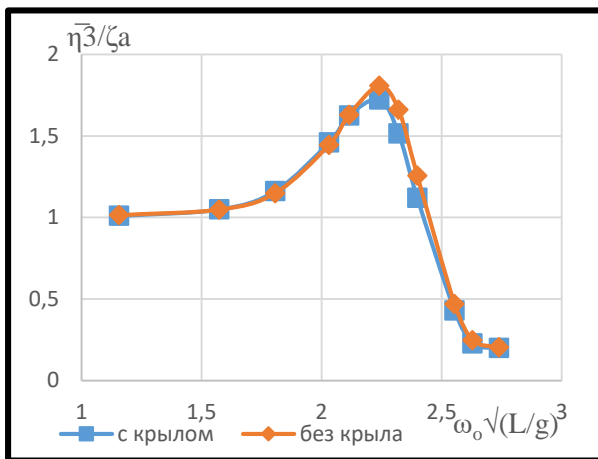


Рис 9. АЧХ вертикальной качки контейнеровоза S-175 при курсовом угле  $\beta = 180^\circ$  (крыло в кормовой части судна),  $U=15,6$  уз.

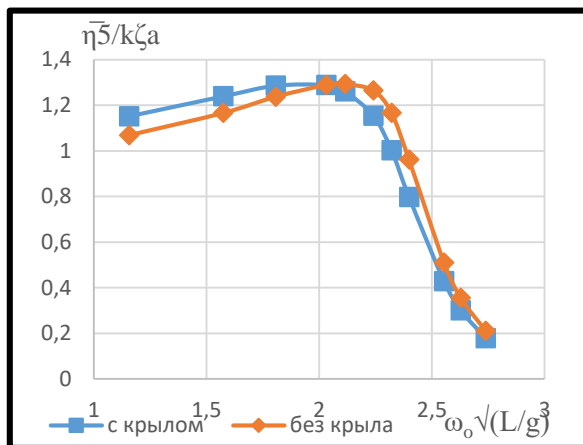


Рис 10. АЧХ килевой качки контейнеровоза S-175 при курсовом угле  $\beta = 180^\circ$  (крыло в кормовой части судна),  $U=15,6$  уз.

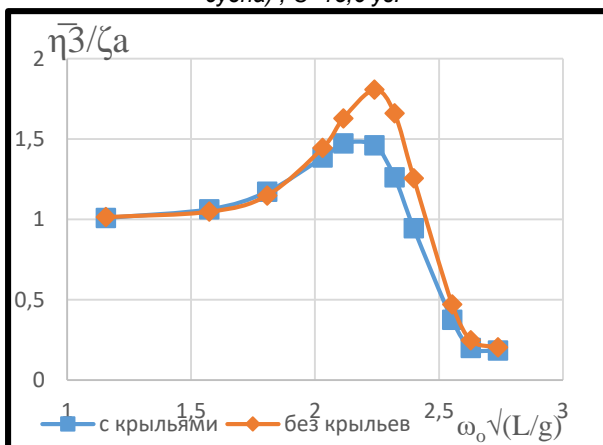


Рис 11. АЧХ вертикальной качки контейнеровоза S-175 при курсовом угле  $\beta = 180^\circ$  (крылья в носовой и кормовой частях судна),  $U=15,6$  уз.

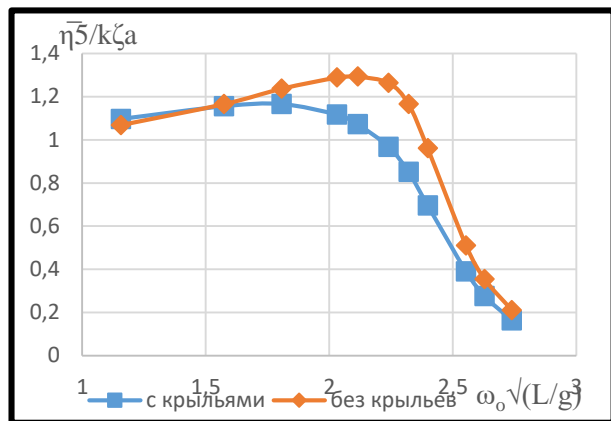


Рис 12. АЧХ килевой качки контейнеровоза S-175 при курсовом угле  $\beta = 180^\circ$  (крылья в носовой и кормовой частях судна),  $U=15,6$  уз.

Результаты расчета продольной качки для судна с крыльевыми устройствами и без них приведены на Рис 7-12. Из них, в частности, следует, что дополнительные крыльевые устройства способствуют уменьшению продольной качки, что неоднократно отмечалось в литературе.

### 2. Определение силы тяги и силы сопротивления

Как для определения инерционного и демпфирующего воздействия крыльев на качающееся судно, так и для определения силы тяги, генерируемой колеблющимися крыльями, в настоящей статье используются результаты теории машущего крыла. В частности применяются формулы расчета производных гидродинамических коэффициентов и осредненной по периоду колебаний силы тяги при комбинированных вертикально-угловых колебаниях крыльев бесконечного удлинения, приведенные в статье одного из авторов [9]. Перечет на конечное удлинение в данной работе осуществлялся по формулам теории несущей линии Прандтля.

Отметим, что при значительной доле подсосывающей силы в общем балансе силы тяги, на входящих кромках может наступить кавитация и отрыв пограничного слоя. Эти явления в данной работе не учитываются.

Полученные в результате расчета качки амплитуды и фазы вертикальных и угловых колебаний крыльевых элементов, вводятся в алгоритм задачи об определении тяги машущего крыла, совершающего вертикально-вращательные колебания для каждого из крыльевых устройств по отдельности.

Полученная в итоге суммарная тяга упомянутых устройств приравнивается полному сопротивлению, что дает возможность оценить скорость для судна данного типа и заданной длины волн.

Сопротивление судна складывается из вязкостного, волнового и дополнительного.

Теоретические методы определения дополнительного сопротивления основаны на анализе потенциального обтекания судна,

движущегося на поверхности невязкой жидкости под воздействием регулярных прогрессивных волн. Наиболее общие решения этой задачи предложены ИМО(2013)[6]. В нашей работе использовалась формула

$$R_{AW} = \frac{1}{4} \rho g \zeta_A^2 B B_f \alpha_T (1 + C_v F_n) \quad (21)$$

Где  $B$  – ширина судна,  $B_f$  - коэффициент угла заострения носовой оконечности,  $C_v$  – коэффициент скорости движения,  $F_n$  – число Фруда,  $\zeta_a$  - амплитуда волны.

Ниже приведены некоторые результаты предварительных расчетов. На Рис. 13, 14, 15 для случая малых, умеренных и больших длин волн приведены кривые сопротивления и тяги системы судно-крылья. При этом рассматривались варианты расположения крыльев в носу, корме и в обеих оконечностях.

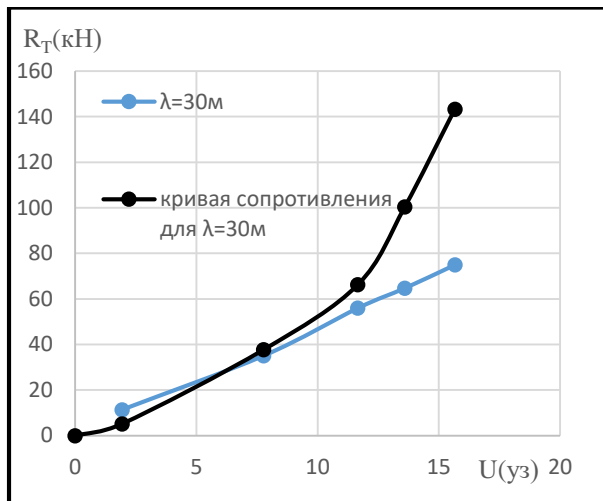


Рис 13. К вычислению скорости и тяги судна, крыло в носовой части судна ( $\lambda = 30\text{м}$ ,  $c=3,5\text{м}$ ,  $s=10,5\text{м}$ )

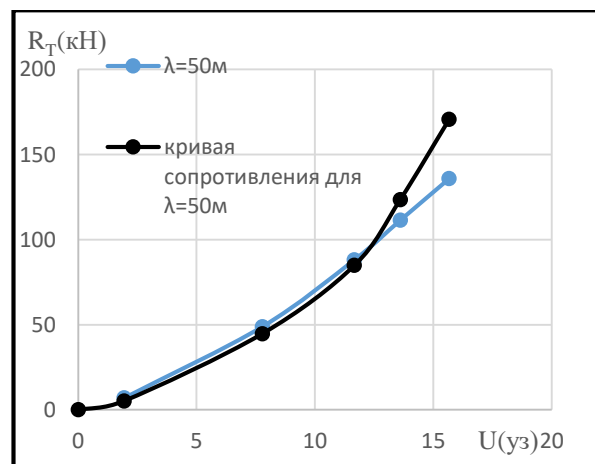


Рис 14. К вычислению скорости и тяги судна, крыло в носовой части судна ( $\lambda = 50\text{м}$ ,  $c=3,5\text{м}$ ,  $s=10,5\text{м}$ )

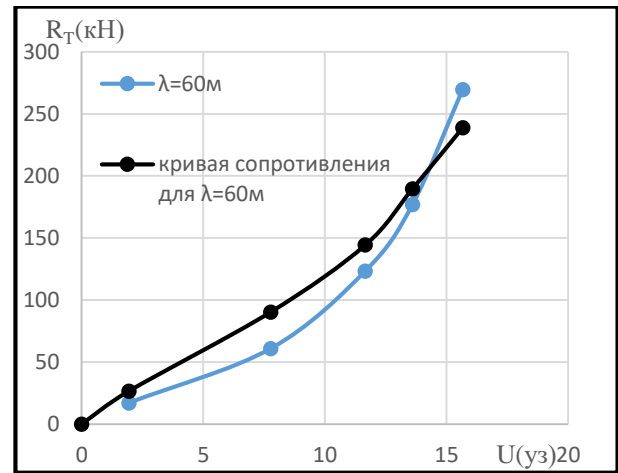


Рис 15. К вычислению скорости и тяги судна, крыло в носовой части судна ( $\lambda = 60\text{м}$ ,  $c=3,5\text{м}$ ,  $s=10,5\text{м}$ )

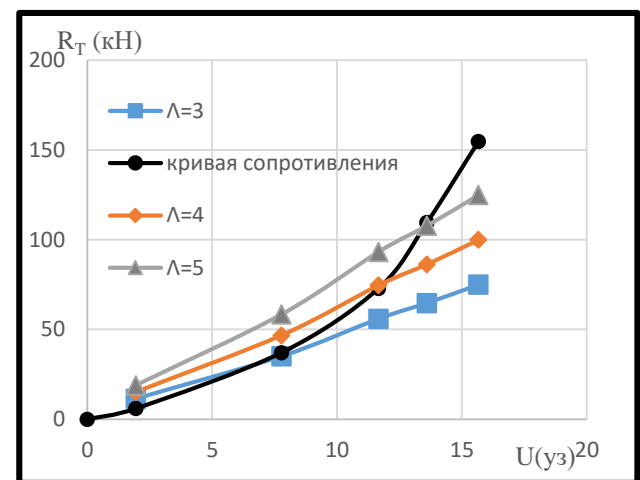


Рис 16. Крыло в носовой части судна и влияние суммарной площади крыльевых элементов ( $\lambda = 30\text{м}$ )

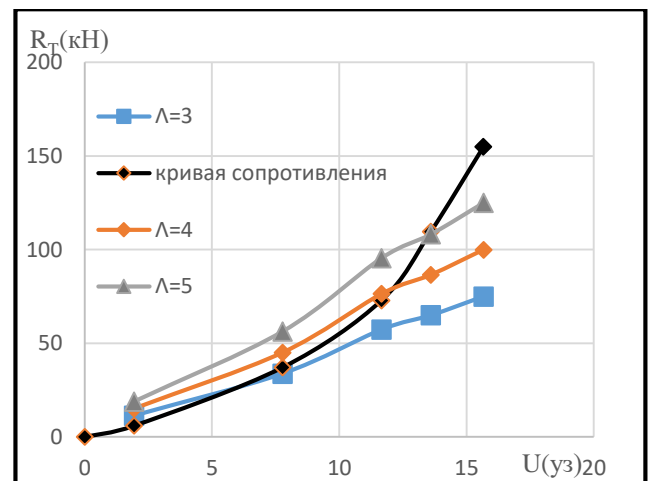


Рис 17. Крыло в корме части судна и влияние суммарной площади крыльевых элементов ( $\lambda = 30\text{м}$ )

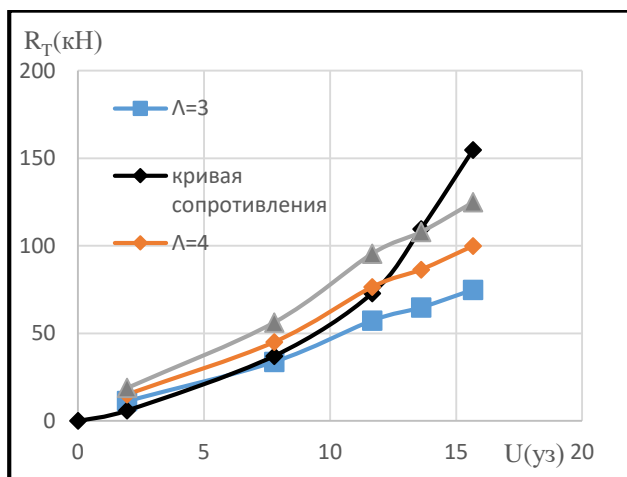


Рис 18. Крылья в носу и корме судна и влияние суммарной площади крыльевых элементов (длина волн  $\lambda = 30\text{м}$ )

Из Рис 13. следует в частности, что при увеличении длины волны увеличивается скорость судна, движущегося за счет энергии волн. С ростом удлинения и площади крыльев тяга также возрастает. Режимы движения исключительно за счет энергии волн, имеют место только при определенных условиях. Для движения с большими скоростями энергосберегающие крыльевые

устройства позволяют снизить требуемую мощность энергетической установки.

**Выводы**

1. В статье предложена новая математическая модель судна, использующего возобновляемую энергию океана. Проведенное исследование позволяет получить представление о механизме и эффективности энергосбережения с применением крыльевых устройств, преобразующих энергию волн в тягу.
2. Из анализа полученных расчетных данных следует:
  - 2.1. Для судов, снабженных энергосберегающими крыльевыми устройствами наблюдается уменьшение продольной качки.
  - 2.2. Эффективность энергосбережения и умерения продольной качки зависит от конфигурации системы (носовое крыло, кормовое крыло, носовое плюс кормовое крылья)
  - 2.3. На встречном волнении носовое крыло в большей степени умеряет продольную качку чем кормовое.
  - 2.4. При увеличении площади крыльев тяга увеличивается, однако одновременно растет вязкостное сопротивление, что необходимо учитывать при проектировании.

Предложенная математическая модель подлежит дальнейшему развитию и совершенствованию.

**Литература**

1. Rozhdestvensky K.V., Ryzhov. V.A. Aerodynamics of flapping wing propulsors. Progress in aerospace sciences 39, 2003. pp 585-633.
2. Nils Salvesen., E. O. Tuck., Odd Magnus Faltinsen. Ship motions and sea loads. The society of naval architects and marine engineers. November 12-13. 1970. P.30.
3. Eirik Bøckmann., Wave Propulsion of Ships. Norwegian University of Science and Technology. Doctoral thesis at NTNU. ISBN 978-82-326-0703-7 (electronic version). 2015. NTNU. Norway.
4. International Maritime Organization (IMO), 2013. Ships and marine technology — Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data. ISO 15016:2002. MEPC 66/INF.X. p. 92.
5. ITTC, seakeeping committee. 1978. p 79-92.
6. Shukui Liu and Apostolos D Papanikalaou. Time domain hybrid method for simulating large amplitude motions advancing in waves. International journal naval architecture and ocean engineering.2011.
7. Рождественский К.В., Математический модуль машущего крыла для задач моделирования судов, движимых энергией волн. Морские интеллектуальные технологии, 2019. В настоящем выпуске журнала.

**Reference**

1. Rozhdestvensky K.V., Ryzhov. V.A. Aerodynamics of flapping wing propulsors. Progress in aerospace sciences 39, 2003. pp 585-633.
2. Nils Salvesen., E. O. Tuck., Odd Magnus Faltinsen. Ship motions and sea loads. The society of naval architects and marine engineers. November 12-13. 1970. P.30.
3. Eirik Bøckmann., Wave Propulsion of Ships. Norwegian University of Science and Technology. Doctoral thesis at NTNU. ISBN 978-82-326-0703-7 (electronic version). 2015. NTNU. Norway.
4. International Maritime Organization (IMO), 2013. Ships and marine technology — Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data. ISO 15016:2002. MEPC 66/INF.X. p. 92.
5. ITTC, seakeeping committee. 1978. p 79-92.
6. Shukui Liu and Apostolos D Papanikalaou. Time domain hybrid method for simulating large amplitude motions advancing in waves. International journal naval architecture and ocean engineering.2011.
7. Rozhdestvensky K.V. Matematicheskiy modul mashushchego kryla dlya modelirovaniya sudov dvizhimih volnovoi energyey. Zhurnal Morskiye intellektualniye tehnologii, 2019, v nastoyaschem vipuske.

УДК 551.46.077:529.584

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ОБТЕКАНИЯ ЗАКРУГЛЕННОЙ ПЕРЕДНЕЙ КРОМКИ КРЫЛОВОГО ПРОФИЛЯ

Кирилл Всеволодович Рождественский

д.т.н., профессор

проректор по международному сотрудничеству

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3

e-mail: kvrxmas@yahoo.com

### Аннотация

В статье с применением метода срачиваемых асимптотических разложений изучается нестационарное обтекание закругленной передней кромки тонкого профиля, которая для аналитических профилей в растянутых переменных аппроксимируется полубесконечной соприкасающейся параболой. Приводятся простые формулы для мгновенного распределения коэффициента давления по контуру кромки, а также минимальных значений этого коэффициента. Входящие в эти формулы неизвестные параметры, получены путем асимптотического срачивания с внешним решением задачи о нестационарном обтекании тонкого профиля методами линейной теории. Приведены соответствующие выражения для указанных параметров в случае вертикальных и угловых колебаний, а также воздействия гармонического порыва. С привлечением интегрального соотношения импульсов для нестационарного ламинарного пограничного слоя, найдена параметрическая граница безотрывного обтекания профиля. Кроме того, определена параметрическая граница бескавитационного обтекания, причем в качестве критерия наступления кавитации принята гипотеза о том, что кавитация наступает когда число кавитации равно полному координатно-временному минимуму коэффициента давления, взятому с противоположным знаком.

**Ключевые слова:** нестационарное обтекание крылового профиля, кавитация и ламинарный отрыв на входящих кромках профилей.

## STUDY OF UNSTEADY FLOW AROUND A ROUNDED LEADING EDGE OF A WING FOIL

Kirill V. Rozhdestvenskii

D. Tech. Sc., Professor

Vice-Rector for International Science & Education

Saint-Petersburg State Marine Technical University

Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190008, Russian Federation

e-mail: kvrxmas@yahoo.com

### Abstract

This paper applies the method of matched asymptotic expansions to study unsteady flow past a rounded leading edge of a thin foil. As for analytical foils such edge can be approximated by an osculating semi-infinite parabola, simple formulae can be derived for simultaneous distribution of pressure coefficient as well as for the minimum magnitude of this coefficient. Therewith, unknown parameters, entering these formulae are, obtained by means of asymptotic matching with the *outer* solution of the problem of unsteady flow in the frame of this foil linear theory. Corresponding expressions for the aforementioned parameters are presented for the case of vertical and angular oscillations, and for the foil subject to action of a vertical gust. With use of momentum relationship for an unsteady laminar flow, there was found a parametric boundary of nonseparated flow past the foil in unsteady motion. Besides, a similar boundary of noncavitating flow was found on the basis of the hypothesis that cavitation inception takes place when cavitation number equals minus full minimum (coordinate-wise and time-wise) of unsteady pressure coefficient.

**Key words:** unsteady flow past a wing foil, cavitation inception and laminar separation at the leading edge of hydrofoils.

### Введение

Известно, что при рассмотрении функционирования крыльев и гребных винтов наиболее сложной задачей является адекватное описание течения вблизи входящих кромок. Размеры зоны течения в непосредственной близости кромок весьма малы, что затрудняет измерение таких характеристик как давление и скорость жидкости. По этой же причине затруднено и применение методов

вычислительной гидродинамики так как сходимость численных методов так же ухудшается. В то же время, именно в окрестности входящих кромок наблюдаются такие критические явления как отрыв пограничного слоя и кавитация. В ранних исследованиях с применением асимптотических методов, получил распространение метод срачиваемых асимптотических разложений (МСАР), позволяющий посредством растяжения координат в



окрестности кромки увеличить кромочную зону и с хорошей практической точностью рассчитать течение в ее окрестности. Для стационарного случая такие подходы были развиты в работах Д. Лайтхилла и М. Ван-Дайка, [1]. В работах [2, 3] было показано, что эти методы дают удовлетворительные результаты и с учетом нестационарности. Заметим, что в этом последнем случае численные методы применять особенно затруднительно.

Ниже показано, как применить МСАР при исследовании нестационарного обтекания закругленных передних кромок тонких профилей, что имеет непосредственное приращение в задачах гидродинамики машущего крыла.

**Постановка задачи**

Рассмотрим тонкий профиль, совершающий малые поперечные колебания и деформационные движения в однородном потоке и подверженный действию малого по амплитуде вертикального порыва. В дальнейшем все величины приведем к безразмерному виду по скорости однородного потока  $U_0$  и полухорде  $b/2$ . Пусть хорда профиля совпадает с отрезком  $[-1, 1]$  оси  $x$ , а мгновенные положения его верхней и нижней стороны заданы уравнением

$$y(x, t) = 2\delta_c f_c(x) \pm 2\delta f_t(x) + \varepsilon f_\varepsilon(x, t), \quad (1)$$

Где  $\delta_c$  и  $\delta$  - относительные максимальные кривизна и толщина профиля;  $\varepsilon$  - амплитуда вертикальных, угловых колебаний или нестационарных деформаций его средней линии; и  $f_c(x), f_t(x)$  - функции порядка  $O(1)$ , дающие соответственно распределение кривизны и толщины профиля; функция  $f_\varepsilon(x, t)$  также имеет порядок  $O(1)$  и характеризует перемещения точек средней линии профиля, вызванные его нестационарными движениями как твердого тела и деформациями. Знак «+» в формуле (1) соответствует засасывающей стороне профиля, а знак «-» нагнетающей. Угол атаки профиля обозначим через  $\alpha$ . Примем за малый параметр относительную толщину профиля  $\delta$  и предположим, что величины  $\delta_c, \alpha$  и  $\varepsilon$  имеют такой же порядок малости, так что их можно записать в виде  $\delta_c = \delta \bar{\delta}_c; \alpha = \delta \bar{\alpha}; \varepsilon = \delta \bar{\varepsilon}$ , причем  $\bar{\delta}_c, \bar{\alpha}, \bar{\varepsilon}$  имеют порядок  $O(1)$ .

Введением в рассмотрение потенциала относительного движения  $\varphi$ , можно свести полную задачу нестационарного обтекания тонкого профиля к: уравнению Лапласа и граничным условиям на профиле, вихревом следе и на бесконечности:

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

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} \quad (3)$$

при  $y_c = y(x, t); -1 \leq x \leq 1;$

$$p^+ = p^- \text{ при } y = y_w(x, t); x \geq 1; \quad (4)$$

$$\nabla \varphi \rightarrow 0 \text{ при } x^2 + y^2 \rightarrow \infty, \quad (5)$$

где  $p(x, t)$  - коэффициент давления, связанный с потенциалом интегралом Лагранжа

$$p(x, t) = 1 - 2 \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 - \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2; \quad (6)$$

$y_w(x, t)$  - ординаты точек вихревого следа

В дальнейшем, в соответствии с методом сращиваемых асимптотических разложений (МСАР), область течения условно разбивается на

характерные зоны:  $D^o$  - зона течения вне кромок профиля (внешняя зона) и  $D^i$  - зона течения вблизи кромок (внутренняя область). Находятся асимптотические представления решения поставленной полной задачи в  $D^o$  и  $D^i$ , которые затем сращиваются в зонах общей пригодности.

Здесь мы сосредоточимся на решении локальной задачи обтекания передней закругленной кромки (зона  $D_{le}^i$ ).

**Течение вблизи передней закругленной кромки**

Перенесем начало координат в точку, совпадающую с вершиной рассматриваемой кромки и введем растяжение кромочных переменных  $x_{le} = x + 1, y_{le} = y$

$$X = \frac{x_{le}}{\Delta(\delta)}; Y = \frac{y_{le}}{\Delta(\delta)};$$

$$\frac{\Delta(\delta)}{\delta} \rightarrow 0 \text{ при } \delta \rightarrow 0, \quad (7)$$

где функция  $\Delta(\delta)$  имеет порядок радиуса области непригодности теории малых возмущений и принимает для закругленной кромки значение

$\Delta(\delta) = \delta^2$ . Полагая, что скорость  $v^i$  течения на контуре кромки во внутренней зоне  $D_{le}^i$  имеет

порядок  $O(1)$ , ищем потенциал в этой зоне  $\varphi^i$  в виде

$$\varphi^i = \Delta(\delta) \varphi_1^i + o[\Delta(\delta)], \varphi_1^i = O(1). \quad (8)$$

Тогда, при  $\delta \rightarrow 0$  и в широком диапазоне чисел

Струхала  $Sh \cdot \delta^2 \ll 1$ , условие непротекания и коэффициент давления, выраженный через интеграл Лагранжа вблизи кромки принимают квазистационарный вид

$$\frac{\partial \varphi_1^i}{\partial Y} = \frac{\partial \varphi_1^i}{\partial X} \frac{\partial Y}{\partial X} + O(\delta^2), \quad (9)$$

$$p^i(X, t) = 1 - \left( \frac{\partial \varphi_1^i}{\partial Y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi_1^i}{\partial X} \right)^2 = 1 - v^{i2}. \quad (10)$$

Таким образом, во всех практически интересных случаях обтекания закругленной кромки, зависимости скорости и давления на ее

контуре от времени оказываются параметрическими.

В то же время вне кромки сохраняется полная нестационарность течения, параметры которой передаются в локальную зону посредством асимптотического сращивания.

Для аналитических профилей с закругленной передней кромкой ее контур вблизи вершины кромки аппроксимируется соприкасающейся параболой и для распределения скорости и коэффициента давления в этой зоне можно получить простые выражения.[1,2]:

$$U^j(X,t) = \sqrt{\frac{X}{X + \bar{\rho}_{le}/2}} \left( U_1 \pm \frac{U_2(t)}{\sqrt{X}} \right); \quad (11)$$

$$P^j(X,t) = 1 - \frac{X}{X + \bar{\rho}_{le}/2} \left( U_1 \pm \frac{U_2(t)}{\sqrt{X}} \right)^2. \quad (12)$$

Заметим, что  $\bar{\rho}_{le}$  есть растянутый радиус закругления передней кромки, сохраняющий свое значение для данного семейства профилей, а параметры  $U_1$  и  $U_2(t)$  получаются посредством асимптотического сращивания (гладкого соединения) локального течения вблизи кромки и внешнего к ней течения. Параметр  $U_1$  имеет смысл местной скорости потока, натекающего на кромку вдоль ее оси симметрии и может быть записан в виде

$$U_1 = 1 + \delta u_\delta, \quad (13)$$

где  $u_\delta$  является постоянным для данного семейства профилей (например, для профиля НАСА-66012  $u_\delta = 0.818$ , для профиля Вальхнера  $u_\delta = 0.919$  и т.п.).

Параметр  $U_2(t) = U_{21} + U_{22}(t)$ , ассоциирован с циркуляционным обтеканием кромки, причем  $U_{21}$  выражается через установочный (стационарный) угол атаки и кривизну профиля

$U_{21} = \bar{\alpha}_s \sqrt{2} - \bar{\delta}_c u_c$ , где  $u_c$  есть параметр кривизны, сохраняющий свое значение для всех профилей заданного семейства (например, для эллипса  $u_c = 0$ , для профиля Вальхнера  $u_c = 0.296$ , а профиля НАСА 66m  $u_c = 0.208$ .)

Наконец, параметр  $U_{22}(t)$  отражает характер нестационарного движения и может быть получен в виде

$$U_{22} = \frac{\bar{\varepsilon} \sqrt{2}}{\pi} \operatorname{Re}[(\hat{A} \hat{C} + \hat{B}) \exp(ikt)], \quad (14)$$

где

$$\hat{A} = \int_{-1}^1 \hat{F}_\varphi \sqrt{\frac{1+\xi}{1-\xi}} d\xi; \hat{B} = - \int_{-1}^1 \hat{F}_\varphi \frac{\xi d\xi}{\sqrt{1-\xi^2}},$$

$$\hat{C}(k) = F(k) + iG(k) = \frac{H_1^{(2)}(k)}{H_1^{(2)}(k) + iH_0^{(2)}(k)}$$

есть функция Теодорсена, выражающаяся через функции Ганкеля первого рода нулевого и первого

порядка. Фигурирующая в формулах для  $\hat{A}$  и  $\hat{B}$ ,

функция  $\hat{F}_\varphi$  представляет собой комплексную

амплитуду нестационарного схода на крыле, равного

$$F_\varphi = \frac{\partial y_c}{\partial x} + \frac{\partial y_c}{\partial t} + w(x,t) = \hat{F}_\varphi \exp(ikt).$$

#### Распределение коэффициента давления на контуре передней кромки в нестационарном потоке

Приведем выражение для  $U_{22}(t)$  для различных видов нестационарного обтекания профиля.

- *вертикальные колебания* с амплитудой  $h_0$ :

$$h(t) = h_0 \cos kt = \exp ikt \quad (15)$$

$$U_{22} = k \bar{h}_0 \sqrt{2} [G(k) \cos kt + F(k) \sin kt], \quad (16)$$

где

$\bar{h}_0 = h_0 / \delta$ ;  $F(k), G(k)$  - действительная и мнимая части функции Теодорсена.

- *угловые колебания* с амплитудой  $\alpha_0$  относительно

точки с абсциссой  $a_0$ :

$$\alpha(t) = \alpha_0 \cos kt, \quad (17)$$

$$U_{22} = \bar{\alpha}_0 \sqrt{2} \left\{ [F(k) + kG(k)(a_0 - \frac{1}{2})] \cos kt + [kF(k)(a_0 - \frac{1}{2}) - G(k) + \frac{k}{2}] \sin kt \right\}. \quad (18)$$

- *гармонический порыв* с вертикальным сходом потока

$$w(x,t) = w_0 \cos k(t-x), \quad (19)$$

$$U_{22} = \bar{w}_0 \sqrt{2} \left\{ [J_0(k)F(k) + J_1(k)G(k)] \cos kt - [J_0(k)G(k) - J_1(k)F(k) + J_1(k)] \sin kt \right\} \quad (20)$$

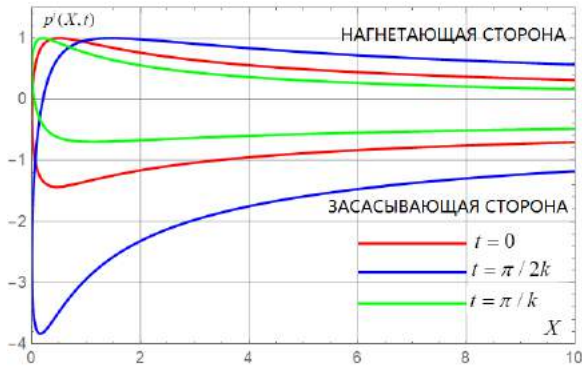


Рис. 1 Мгновенное распределение коэффициента давления по контуру передней закругленной кромки профиля Вальхнера ( $G\ddot{O}-7$ ), совершающего вертикальные и угловые колебания и одновременно подвергнутого действию гармонического порыва

При рассмотрении комбинации нестационарных эффектов, соответствующее значение  $U_{22}$  определяется алгебраическим суммированием составляющих.

На Рис. 1 представлены распределения коэффициента давления по профилю Вальхнера, одновременно совершающего вертикальные и угловые колебания, а также подвергнутого воздействию вертикального гармонического порыва (относительная толщина и кривизна  $\delta = 0.1, \delta_c = 0.03$ , установочный угол атаки  $\alpha_s = 0.05$ , амплитуды вертикальных и угловых колебаний  $h_0 = 0.05$  и  $\alpha_0 = 0.05$ , относительная максимальная скорость вертикального гармонического порыва  $w_0 = 0.05$ , угловые колебания отстают от вертикальных на угол  $\psi = \pi/2$ , число Струхала  $k = 0.5$ ).

**Определение минимальных давлений на входящей кромке**

Рассмотрение локальной задачи обтекания закругленной передней кромки позволяет после определения величин  $U_1$  и  $U_2$  существенно упростить процедуру определения минимальных давлений, в том числе в случае нестационарного движения профиля, что имеет большое практическое значение с точки зрения прогнозирования кромочной кавитации при различных режимах работы профиля. Минимум давления в фиксированный момент времени  $t$  можно получить приравняв производную по  $p^i$  по  $X$  нулю, откуда

$p_{\min}^i = 1 - U_1^2 - 2U_2^2 / \bar{p}_{le}$ , причем минимум достигается в точке с растянутой абсциссой

$$X_m(t) = \left[ \frac{\bar{p}_{le} U_1}{2U_2(t)} \right]^2. \tag{21}$$

Попутно отметим, что положение критической точки, определяемое из условия  $U^i = 0$ , дается формулой  $X_s(t) = U_2^2(t) / U_1^2$ , так что с учетом формулы (21) имеем

$$X_m(t) X_s(t) = \frac{1}{4} \bar{p}_{le}^2. \tag{22}$$

Согласно (22) произведение абсцисс критической точки и точки минимума давления равно квадрату полурадиуса закругленной кромки и, таким образом, даже при нестационарном движении, не зависит от времени.

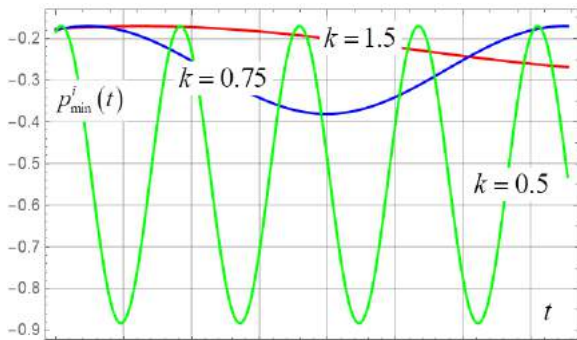


Рис. 2 Значения минимального коэффициента давления на передней закругленной кромке симметричного профиля NASA-66012, совершающего вертикальные колебания, в зависимости от времени при различных значениях числа Струхала  $k$

$$(\delta = 0.1, u_\delta = 0.82, \bar{p}_{le} = 0.874)$$

Поскольку функция  $p_{\min}^i(t)$  зависит от времени, можно найти ее минимальное значение, которое мы обозначим через  $p_{\min\min}^i$ . Условие минимальности  $p_{\min\min}^i$  по времени, как нетрудно видеть, эквивалентно условию максимальности величины  $U_2(t)$  по  $t$ .

Приравняв  $\dot{U}_2$  нулю

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{22} = \frac{\bar{\varepsilon}\sqrt{2}}{\pi} \operatorname{Re}[ik(\hat{A}\hat{C} + \hat{B}) \exp ikt] = 0, \tag{23}$$

найдем значение произведения  $kt$ , при котором достигается  $p_{\min\min}^i$  и  $U_{22\max}$

$$(kt)_{\min} = \arctan \frac{\operatorname{Im}(\hat{A}\hat{C} + \hat{B})}{\operatorname{Re}(\hat{A}\hat{C} + \hat{B})}, \tag{24}$$

а величина максимума нестационарной части

$$U_{22} = \frac{\bar{\varepsilon}\sqrt{2}}{\pi} k |\hat{A}\hat{C} + \hat{B}|, \tag{25}$$

где вертикальные черточки есть знак модуля комплексного числа.

Величина  $p_{\min \min}^i$  достигается в частных случаях при

- вертикальных колебаниях:

$$U_{22\max} = \sqrt{2k\bar{h}_0} \left| \hat{C}(k) \right| = \sqrt{2k\bar{h}_0} \sqrt{F^2(k) + G^2(k)}; \quad (26)$$

- угловых колебаниях:

$$U_{22\max} = \sqrt{2\bar{\alpha}_0} \sqrt{\left[ F(k) + kG(k)\left(a_0 - \frac{1}{2}\right) \right]^2 + \left[ kF(k)\left(a_0 - \frac{1}{2}\right) - G(k) + \frac{k}{2} \right]^2}. \quad (27)$$

- при гармоническом вертикальном порыве:

$$U_{22\max} = \bar{w}_0 \sqrt{2} \sqrt{\left[ J_0(k)F(k) + J_1(k)G(k) \right]^2 + \left[ J_0(k)G(k) - J_1(k)F(k) + J_1(k) \right]^2}.$$

Окончательное аналитическое выражение для минимума (полного: по  $X$  и  $t$ ) коэффициента давления принимает вид

$$p_{\min \min}^j = 1 - U_1^2 - \frac{2}{\bar{\rho}} (U_{21} + U_{22\max})^2. \quad (28)$$

где величина  $U_{22\max}$  в достаточно общем случае нестационарных колебаний дается формулой (23). Приведенное выше выражение связывает полное минимальное давление на контуре входящей закругленной кромки профиля с его формой, относительной толщиной, кривизной, углом атаки, законом нестационарного движения, значением числа Струхала и амплитудами колебаний. На Рис. 3 приводятся результаты расчета полного минимума коэффициента давления для трех видов нестационарного обтекания

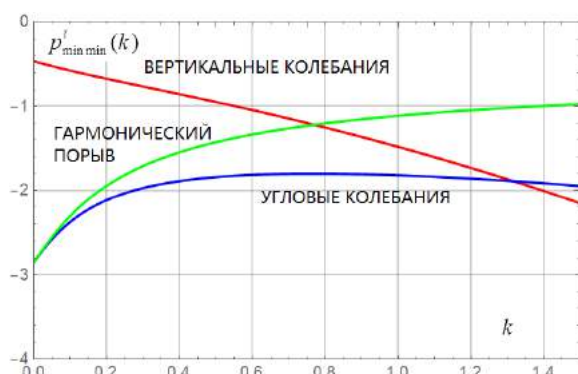


Рис. 3 Зависимость полного минимума коэффициента давления от числа Струхала для трех случаев нестационарного обтекания (профиль NACA-66t,

$$\delta = 0.1, \delta_c = 0.03,$$

$$h_0 = \alpha_0 = w_0 = 0.05, \alpha_s = 0.03)$$

### Определение границы бескавитационного и безотрывного обтекания закругленной передней кромки машущего крылового профиля

Известными препятствиями с точки зрения реализации подсосывающей силы на передней закругленной кромке при нестационарном обтекании профиля являются кавитация и отрыв пограничного слоя. Аналитический вид выражения для локального распределения давления упрощает исследование условий наступления этих явлений и, таким образом, позволяет найти соответствующие параметрические границы.

Если принять за критерий наступления кавитации гипотезу о том, что она наступает в тех точках профиля, где местное давление становится равным давлению насыщенного пара, то можно найти границу бескавитационного обтекания передней закругленной кромки посредством приравнивания коэффициента полного минимума давления  $p_{\min \min}^i$  числу кавитации  $\sigma$ , взятому с противоположным знаком. Пользуясь указанным критерием возникновения кавитации и формулой (28) для полного минимума коэффициента давления на передней кромке при нестационарном обтекании, запишем **уравнение параметрической границы бескавитационного обтекания** следующим образом:

$$\sigma = -p_{\min \min}^i = \frac{2}{\bar{\rho}_{le}} (U_{21} + U_{22\max})^2 + U_1^2 - 1. \quad (29)$$

При заданном числе кавитации уравнение (29) представляет собой предельное соотношение параметров нестационарного обтекания профиля на границе бескавитационного обтекания. Рассмотрим к примеру, вертикальные колебания профиля Вальхнера имеющего относительную толщину и кривизну  $\delta = 0.1, \delta_c = 0.05$  и нулевой установочный угол атаки  $\alpha_s = 0$ . Учтем, что относительный радиус закругления носовой части  $\bar{\rho}_{le}$  и входящие в формулы для  $U_1 = 1 + \delta u_\delta$  и  $U_{21} = \bar{\alpha}_s \sqrt{2} - \delta_c u_c$  параметры  $u_\delta$  и  $u_c$  для семейства профилей Вальхнера равны соответственно 0.964, 0.919 и 0.246.

Для рассматриваемого случая нестационарного движения уравнение параметрической границы бескавитационного обтекания примет вид



зависимости допустимой амплитуды вертикальных колебаний от числа Струхала<sup>1</sup>.

Принимая число кавитации равным  $\sigma = 1, 2, 3$  и используя формулы (26) и (29) рассчитаем зависимость допустимых амплитуд вертикальных колебаний на границе бескавитационного обтекания, см. Рис. 4.

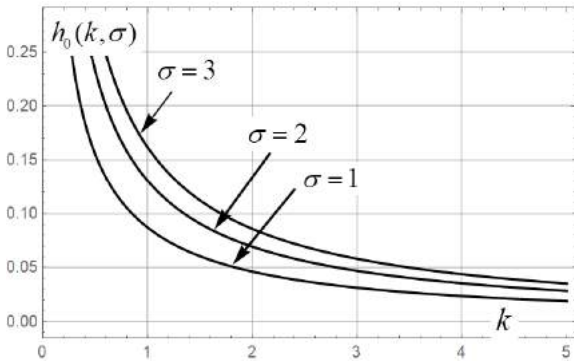


Рис. 4 Максимальная допустимая относительная амплитуда вертикальных колебаний в зависимости от числа Струхала при различных значениях числа кавитации для заданного профиля Вальхнера.

Обратимся теперь к ограничению по наступлению ламинарного отрыва на передней закругленной кромке профиля в нестационарном потоке.

Запишем интегральное соотношение импульсов для нестационарного ламинарного пограничного слоя в безразмерном виде, принимая в качестве характерных величин скорость горизонтального поступательного движения профиля  $U_0$  и его полухорду  $b/2$ , [4]

$$k(H + 2f^* \frac{dH}{df^*}) \frac{\partial f^*}{\partial t} + v \frac{\partial f^*}{\partial s} = \left[ \left( \frac{k}{\bar{\Omega}} \frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial t} - 2\bar{\Omega} \right) H + v \left( \frac{1}{\bar{\Omega}} \frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial s} - \frac{4}{v} \frac{\partial v}{\partial s} \right) \right] f^* + 2\bar{\Omega} \zeta, \quad (29)$$

$$\text{где } \bar{\Omega} = \Omega \frac{b}{2U_0} = \frac{k}{v} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial s}; H = \frac{\delta^*}{\delta^{**}} \text{ и}$$

$\delta^*, \delta^{**}$  - толщины вытеснения и потери импульса;  $v$  - скорость на внешней границе пограничного слоя;  $s$  - дуговая координата, отсчитываемая от критической точки;  $\zeta(f^*)$  - безразмерный коэффициент трения в точках контура профиля;  $f^* = \delta^{**2} \Omega / v$  - форпараметр при нестационарном обтекании.

Рассматривая это уравнение в дуговой переменной передней кромки  $S = s / \delta^2$ , где

$S = s / \delta^2$ , где  $S$  - растянутая дуговая координата, и переходя к внутреннему пределу при фиксированном  $S$  и  $\delta \rightarrow 0$ , приходим к следующему виду интегрального соотношения импульсов (29) в окрестности входящей кромки:

$$f'_S = \frac{v_{SS}^{i''}}{v_S^{i'}} f + \frac{v_S^{i''}}{v^i} \psi(f), \quad (30)$$

где штрихи обозначают дифференцирование по растянутой дуговой координате  $S$ , а функция  $\psi(\zeta)$  имеет вид

$$\psi(\zeta) = 2[\zeta(f) - (2 + H)f]; f = f^* \quad (31)$$

при  $\bar{\Omega} = \frac{\partial v^i}{\partial s}$ . Уравнение (30), справедливое при

$k \ll 1 / \delta^2$ , то есть в достаточно широком диапазоне чисел Струхала, по своей форме с точностью до обозначений совпадает с уравнением Кочина-Лойцянского для стационарного ламинарного пограничного слоя.

Таким образом, вблизи закругленной передней кромки тонкого крылового профиля при умеренных значениях числа Струхала координатные градиенты преобладают над градиентами по времени и интегральное соотношение пограничного слоя идентично стационарному.

Используя известную аппроксимацию функции

$$\psi(f) = a^* - b^* f; a^* = 0.45, b^* = 6,$$

Выпишем, следуя Л.Г. Лойцянскому [4], интеграл уравнения (30) относительно формпараметра  $f$

$$f(S) = \frac{2\delta^{**2}}{vb} \frac{\partial v^j}{\partial S} U_0 = a^* \frac{\partial v^j}{\partial S} \int_0^S [v^j(S)]^{b^*-1} dS,$$

или, после перехода к растянутой абсциссе  $X$ , отсчитываемой от вершины кромки

$$f(X) = a^* \sqrt{\frac{X}{X + \bar{\rho}_{le}/2}} \frac{\partial v^j}{\partial X} \int_{\tilde{X}_s}^X [v^j(X)]^{b^*-1} \cdot \sqrt{\frac{X + \bar{\rho}_{le}/2}{X}} dX.$$

С учетом формулы для  $v^j(X)$  и при  $b^* = 6$  интеграл вычисляется в замкнутом виде:

$$f(\tilde{X}, \tilde{X}_s) = \frac{0.45(1/2 - \sqrt{\tilde{X}\tilde{X}_s})(\tilde{X} + 1/2)}{(\sqrt{\tilde{X}} + \sqrt{\tilde{X}_s})^6} \times$$

<sup>1</sup> Для определенности рассматривается запаздывание угловых колебаний от вертикальных на угол  $\psi = \pi / 2$ .

$$\left\{ \frac{1}{2}(\tilde{X} - \tilde{X}_s) + 5\sqrt{\tilde{X}_s}(\sqrt{\tilde{X}} + \sqrt{\tilde{X}_s}) + \frac{a_1}{2} \ln \left| \frac{\tilde{X} + 1/2}{\tilde{X}_s + 1/2} \right| + \frac{(a_1/2 - a_3)(\tilde{X}_s - \tilde{X})/2 + (a_4 - a_2/2)[\sqrt{\tilde{X}}(\tilde{X} + 1/2) + \sqrt{\tilde{X}_s}(\tilde{X}_s + 1/2)]}{(\tilde{X} + 1/2)(\tilde{X}_s + 1/2)} + \frac{a_4 + a_2/2}{\sqrt{1/2}} \left( \arctan \sqrt{2\tilde{X}} + \arctan \sqrt{2\tilde{X}_s} \right), \right.$$

где  $a_1 = 2(5\tilde{X} - 1/2)$ ;  $a_2 = 10\sqrt{\tilde{X}_s}(\tilde{X}_s - 1/2)$ ;

$$a_3 = 5\tilde{X}_s^2 - 1/4; a_4 = \sqrt{\tilde{X}_s}(\tilde{X}_s^2 - 5/4);$$

$$\tilde{X}_s = [U_2(t) / (U_1\sqrt{\rho_{le}})]^2.$$

Положение точки отрыва можно определить, задавшись величиной формпараметра в этой точке:

$$f(\tilde{X}_{sep}, \tilde{X}_s) = -0.09.$$

Из этого уравнения следует, что каждому положению критической точки (времени) соответствует некоторое положение точки отрыва ламинарного пограничного слоя. Для определения границы безотрывного обтекания учтем, что зависимость формпараметра  $f$  от растянутой абсциссы имеет гладкий минимум. Поэтому для нахождения положения критической точки, при котором начнется отрыв можно ввести следующее дополнительное уравнение

$$f'_X(\tilde{X}_{sep}, \tilde{X}_s) = 0.$$

Численное решение системы уравнений дает

$$X_s^* = \left( \frac{U_2}{U_1\sqrt{\rho_{le}}} \right)^* = 0.92$$

Последнее равенство и дает параметрическую границу ламинарного отрыва. Подставляя в вышеуказанное уравнение параметры геометрии исследуемых профилей и их нестационарных движений можно, аналогично рассмотренному выше случаю границы бескавитационного обтекания найти границу безотрывного обтекания. Отметим, что в стационарном случае аналогичное исследование выполнено в [5].

### Заключение

1. В данной статье на основе метода сращиваемых асимптотических разложений определены распределенные гидродинамические характеристики (относительная скорость и коэффициент давления) для различных случаев нестационарного обтекания передней закругленной кромки тонких аналитических профилей.

2. Получены замкнутые выражения для вычисления полного минимума. Показано как определить границы бескавитационного и безотрывного (ламинарный отрыв) обтекания передней кромки.

3. Приведены расчетные данные по распределенным и минимальным значениям коэффициента давления в функции от параметров геометрии и нестационарного обтекания

4. Получены уравнения параметрических границ бескавитационного и безотрывного нестационарного обтекания закругленных входящих кромок и приведены соответствующие расчетные данные.

### Литература

1. Milton Van-Dyke, Perturbation methods in fluid mechanics, Academic Press, 1964, 229 p.
2. Рождественский К.В., «Метод сращиваемых асимптотических разложений в гидродинамике крыла», Ленинград, Издательство «Судостроение», 1979, 208 с.
3. Рождественский К.В., Мишкевич В.Г., «Расчет нестационарного обтекания тонкого профиля на основе метода сращиваемых асимптотических разложений», Вопросы судостроения, сер. «Проектирование судов», 1983, выпуск 37, с. 60-73.
4. Лойцянский Л.Г. Ламинарный пограничный слой. М., Физматгиз, 1962.
5. Мелешко С.В. «Использование результатов метода сращиваемых разложений для расчета ламинарного пограничного слоя на передней закругленной кромке профиля», НТО им. акад. А.Н. Крылова, Материалы по обмену опытом, 1983, вып. 3, Гидродинамика высоких скоростей, Л., Судостроение, с. 38-43.

### References

1. Milton Van-Dyke, Perturbation methods in fluid mechanics, Academic Press, 1964, 229 p.
2. Rozhdstvenskii K.V., «Metod sraschivaemykh asimptoticheskikh razlozhenii v gidrodinamike kryla», Leningrad, Izdatel'stvo «Sudostroenie», 1979, 208 s.
3. Rozhdstvenskii K.V., Mishkevich V.G. «Raschet nestacionarnogo obtekanija tonkogo profilja na osnove metoda sraschivaemykh asimptoticheskikh razlozhenii», Voprosy sudostroenija, ser. «Proektirovanie sudov», 1983, vypusk 37, s. 60-73.
4. Loitsyanskiy L.G. Laminarniy pogranichniy sloj. M. Fizmatgiz, 1962.
5. Meleshko S.V., «Ispol'sovaniye rezultatov metoda sraschivatmih razlozheniy dlya rascheta laminarnogo pogranichnogo sloya na peredney zakruglennoy kromke profilja», NTO imeni akad. A.N. Krilova, Materiali po obmenu opitom, 1983, vyp. 3, Gidrodinamyka visokyh skorostey, L., Sudostroeniye, s. 38-43.

УДК 551.46.077:529.584

## МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ МАШУЩЕГО КРЫЛА ДЛЯ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ СУДОВ, ДВИЖИМЫХ ЭНЕРГИЕЙ ВОЛН

Кирилл Всеволодович Рождественский

д.т.н., профессор

проректор по международному сотрудничеству

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

e-mail: kvrxmas@yahoo.com

### Аннотация

В предлагаемой статье получены основные соотношения, позволяющие определить нестационарные характеристики крыльевых элементов в составе энергосберегающих движительных комплексов. В частности, приведены формулы для вычисления скачка давления, коэффициентов подъемной силы и продольного момента, а также коэффициентов мгновенной и осредненной по периоду силы тяги для крылового профиля, совершающего вертикальные, угловые и смешанные колебания с малой амплитудой, а также подверженного воздействию вертикального гармонического порыва. В случае смешанных вертикально-угловых колебаний исследована возможность получения максимальной тяги путем оптимизации системы по соотношению амплитуд и фаз составляющих движений. Показано, что при достаточно малых числах Струхала смешанные колебания могут приводить к существенному увеличению коэффициента средней тяги по сравнению с аналогичным параметром при чисто вертикальных колебаниях. Как пример пропульсивной системы, включающей упругие элементы, рассматривается задача о возбуждении «упругих» вращательных колебаний профиля, совершающего вынужденные вертикальные колебания. Решение открывает перспективу настройки пропульсивных крыльевых устройств на характеристики бассейна эксплуатации.

**Ключевые слова:** нестационарное обтекание крылового профиля, тяга машущего крыла.

## MATHEMATICAL MODULE OF A “FLAPPING” FOIL FOR MODELING OF WAVE-POWERED SHIPS

Kirill V. Rozhdestvenskii

D. Tech. Sc., Professor

Vice-Rector for International Science & Education

Saint-Petersburg State Marine Technical University

Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190008, Russian Federation

e-mail: kvrxmas@yahoo.com

### Abstract

Obtained in the present paper are main relationships, enabling determination of unsteady characteristics of flapping wing elements as part of energy saving propulsive complexes. Presented in particular are the formulae obtained with use of the theory of acceleration potential for calculation of the pressure jump, lift and longitudinal moment as well as instantaneous and period averaged thrust on a thin foil, performing vertical, angular and mixed oscillations and/or subject to action of a vertical harmonic gust. In the case of mixed oscillations a possibility of obtaining maximum thrust is shown through optimization of the system with respect to the relationship of the amplitudes and phases of constituting motions. It has been shown that for sufficiently small Strouhal numbers mixed oscillations can lead to a considerable increase of averaged thrust as compared to similar parameter in the case of purely vertical oscillations. As an example of propulsive system, including elastic elements, there is considered a problem of excitation of elastic angular oscillations of the foil subject to forced vertical motions. Solution of this problem revealed possible resonant growth of the amplitudes of elastic angular oscillations, and opens a perspective of tuning up wing-type propulsion devices to a particular basin of operation.

**Key words:** unsteady flow past a wing foil, thrust of oscillating wing

### Введение

В последнее время, в связи с тенденцией к максимальному использованию возобновляемой энергии океана возрос интерес к применению на судах устройств типа *машущее крыло* для создания дополнительного волнового упора. В частности, растет число исследований возможности моделирования функционирования судов, оснащенных энергосберегающими крыльями.

Необходимость в разработке соответствующих математических моделей побуждает исследователей обращаться к традиционным и современным (вычислительным) подходам к определению нестационарных гидродинамических характеристик крыльев, [1,2,3,4]. Поскольку машущие крылья, закрепленные на корпусе судна, участвуют в качке последнего, необходимо уметь вычислять гидродинамические силы и моменты, включая тягу, при комбинированных поступательно-



вращательных колебаниях, а также реакцию крыльевых элементов (жестких и упругих) на орбитальное движение жидких частиц, вызванное волнообразованием. Соответствующие формулы получены и систематизированы в данной работе на основе теории потенциала ускорений.

**Скачок коэффициента давления на тонком профиле при нестационарном обтекании**

Комплексная амплитуда скачка коэффициента давления в общем случае нестационарного обтекания найдена в [4] с применением теории потенциала ускорений [5] в виде

$$[\hat{p}] = 2\hat{a}\sqrt{\frac{1-x}{1+x}} + 4ikc\sqrt{1-x^2} - \frac{4ik\hat{B}}{\pi} \left( \arcsin x - \frac{\pi}{2} \right) + [\hat{p}_1] + ik \int_0^x [\hat{p}_1] d\xi, \quad (1)$$

где

$$[\hat{p}_1] = -\frac{4}{\pi} \sqrt{1-x^2} \int_{-1}^1 \frac{\hat{F}_\varphi d\xi}{\sqrt{1-\xi^2}(\xi-x)}, \quad (2)$$

Отметим, что интеграл в формуле (2) вычисляется в смысле главного значения по Коши.

Входящие в уравнение (1) параметры  $\hat{a}, c$  и  $\hat{B}$  даются формулами

$$\hat{a} = -\frac{2}{\pi} (\hat{A}\hat{C} + \hat{B}), \quad c = -\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{\hat{F}_\varphi d\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}, \quad (3)$$

$$\hat{A} = \int_{-1}^1 \frac{\hat{F}_\varphi \sqrt{1+\xi}}{\sqrt{1-\xi}} d\xi, \quad \hat{B} = -\int_{-1}^1 \frac{\hat{F}_\varphi \xi d\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}, \quad (4)$$

где  $\hat{C}(k) = F(k) + iG(k)$  есть функция Теодор-сена, которая выражается через функции Ганкеля второго рода первого и нулевого порядка

$$\hat{C}(k) = \frac{H_1^{(2)}(k)}{H_1^{(2)}(k) + iH_0^{(2)}(k)}, \quad (5)$$

а  $\hat{F}_\varphi$  представляет собой комплексную амплитуду нестационарного скачка на профиле

$$F_\varphi(x, t) = \hat{F}_\varphi(x, t) \exp(ikt) = \frac{\partial y_c}{\partial x} + \frac{\partial y_c}{\partial t}$$

в котором  $y_c(x, t)$  есть уравнение средней линии, а

$k = \omega b / 2U_0$  есть число Струхала составленное по круговой частоте нестационарного возмущения,  $b$  - хорда крыла, а  $U_0$  скорость движения профиля,  $i = \sqrt{-1}$ .

**Коэффициенты подъемной силы, продольного момента, подсосывающей силы и силы тяги**

Располагая распределением скачка коэффициента давления, можно вычислить коэффициенты силы и продольного момента

$$\hat{C}_y = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 [\hat{p}] d\xi, \quad \hat{m}_z = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 [\hat{p}] (\xi - a_0) d\xi. \quad (6)$$

Последний коэффициент можно переписать таким образом

$$\hat{m}_z = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 [\hat{p}] (\xi - a_0) d\xi = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 [\hat{p}] \xi d\xi - \frac{a_0}{2} \int_{-1}^1 [\hat{p}] d\xi = \hat{m}_{z0} - a_0 \hat{C}_y, \quad (7)$$

где  $a_0$  - абсцисса точки, относительно которой вычисляется момент,  $\hat{m}_{z0}$  - комплексная амплитуда коэффициента продольного момента относительно середины профиля.

Принимая во внимание выражение для скачка коэффициента давления можно найти

$$\hat{C}_y = -2(\hat{A}\hat{C} + ik\hat{E}), \quad \hat{E} = \int_{-1}^1 \frac{\hat{F}_\varphi \sqrt{1-\xi^2}}{d\xi}. \quad (8)$$

Вычисление коэффициента момента осуществляется с учетом распределения скачка коэффициента давления. Для конкретных случаев нестационарных гармонических возмущений соответствующие формулы приведены ниже.

Мгновенное значение коэффициента подсосывающей силы вычисляется по формуле

$$C_q(t) = \frac{\pi}{2} [\text{Re}(\hat{a} \exp(ikt))]^2 \quad (9)$$

Среднее за период значение коэффициента подсосывающей силы равно

$$\langle C_q \rangle = \frac{k}{2\pi} \int_0^{2\pi/k} C_q(t) dt = \frac{\pi}{4} [(\text{Re} \hat{a})^2 + (\text{Im} \hat{a})^2]. \quad (10)$$

Кроме подсосывающей силы вклад в тягу дает проекция нормальных сил на направление движения. В произвольный момент времени соответствующий коэффициент вычисляется по формуле

$$\bar{C}_x(t) = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 [p] \frac{\partial y_c}{\partial \xi} d\xi, \quad (11)$$

Мгновенное значение коэффициента силы тяги  $C_t(t)$  определяется суммой  $\bar{C}_x(t)$  и  $C_q(t)$ . В

частности, для симметричного профиля с мгновенным углом атаки  $\alpha(t)$  при чисто угловых колебаниях

$$C_t(t) = \frac{\pi}{2} [\text{Re}(\hat{a} \exp ikt)]^2 - \alpha(t) [C_y^\alpha \alpha(t) + C_y^{\hat{\alpha}} \dot{\alpha}(t)], \quad (12)$$

Осредненное по периоду гармонического нестационарного возмущения значение коэффициента силы тяги вычисляется так

$$\langle C_t \rangle = \frac{k}{2\pi} \int_0^{2\pi/k} C_t(t) dt = \langle C_q \rangle + \langle \bar{C}_x \rangle. \quad (13)$$

В рассматриваемом частном случае симметричного профиля при изменении угла атаки по закону  $\alpha(t) = \alpha_0 \cos kt$  имеем

$$\langle C_t \rangle = \frac{\pi}{4} [(\text{Re} \hat{a})^2 + (\text{Im} \hat{a})^2] - \frac{1}{2} \alpha_0^2 C_y^\alpha. \quad (14)$$

Приступим к рассмотрению конкретных случаев.

### Вертикальные колебания

При чисто вертикальных колебаниях имеем<sup>2</sup>  $h(t) = h_0 \cos kt = h_0 \exp(ikt)$ . Тогда

$F_\varphi(x, t) = ih_0 k \exp(ikt)$ ,  $\hat{F}_\varphi = ih_0 k$  и применяя приведенные выше формулы, получим

$$[\hat{p}] = 2\hat{a} \sqrt{\frac{1-x}{1+x}} + 4k^2 h_0 \sqrt{1-x^2}, \quad (15)$$

$$\hat{C}_y = -h_0 k \pi [2i\hat{C}(k) - k], \quad (16)$$

$$\hat{m}_z^0 = -\pi \hat{a} = 2\pi i k h_0 \hat{C}(k), \quad (17)$$

$$\langle C_t \rangle = \langle C_q \rangle = \frac{\pi}{4} k^2 [(a^{\hat{h}})^2 + k^2 (a^{\hat{\alpha}})^2], \quad (18)$$

где  $a^{\hat{h}} = -2F(k)$ ,  $a^{\hat{\alpha}} = -2G(k)/k$ .

Соответствующие зависимости мгновенных характеристик при чисто вертикальных колебаниях найдены в виде

$$C_y(t) = C_y^{\hat{h}} \dot{h}(t) + C_y^{\hat{\alpha}} \dot{\alpha}(t), \quad (19)$$

$$C_y^{\hat{h}} = -2\pi F(k), C_y^{\hat{\alpha}} = -\frac{2\pi}{k} \left[ G(k) + \frac{k}{2} \right]; \quad (20)$$

$$m_{z_0}(t) = m_{z_0}^{\hat{h}} \dot{h}(t) + m_{z_0}^{\hat{\alpha}} \dot{\alpha}(t), \quad (21)$$

$$m_{z_0}^{\hat{h}} = 2\pi F(k), m_{z_0}^{\hat{\alpha}} = \frac{2\pi G(k)}{k}; \quad (22)$$

$$C_t(t) = C_q(t) = \frac{\pi}{2} [(a^{\hat{h}})^2 + (a^{\hat{\alpha}})^2] = \frac{\pi}{2} [(a^{\hat{h}})^2 \dot{h}^2 + 2a^{\hat{h}} a^{\hat{\alpha}} \dot{h} \dot{\alpha} + (a^{\hat{\alpha}})^2 \dot{\alpha}^2], \quad (23)$$

или, альтернативно:

$$C_t(t) = C_t^{\hat{h}\hat{h}} \dot{h}^2(t) + C_t^{\hat{h}\hat{\alpha}} \dot{h}(t) \dot{\alpha}(t) + C_t^{\hat{\alpha}\hat{\alpha}} \dot{\alpha}^2(t), \quad (24)$$

### Угловые колебания

При чисто угловых колебаниях относительно оси с абсциссой  $a_0$  имеем

$$\alpha(t) = \alpha_0 \cos(kt) = \alpha_0 \exp(ikt) \quad (25)$$

$$F_\varphi(x, t) = -\alpha_0 \cos kt + \alpha_0 k(x - a_0) \sin kt, \quad (26)$$

$$\hat{F}_\varphi = -\alpha_0 - i\alpha_0 k(x - a_0). \quad (27)$$

$$[\hat{p}] = \hat{a} \sqrt{\frac{1-x}{1+x}} + 4ik\alpha_0(2 - ika_0) \sqrt{1-x^2} - 2k^2 \alpha_0 x \sqrt{1-x^2}, \quad (28)$$

$$\hat{C}_y = 2\pi\alpha_0 \left\{ F(k) + kG(k)(a_0 - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2} k^2 a_0 + i[G(k) - kF(k)(a_0 - \frac{1}{2}) + \frac{k}{2}] \right\}, \quad (29)$$

$$\hat{m}_{z_0} = -\frac{\pi}{2} \left( \hat{a} + \frac{k^2 \alpha_0}{4} \right), \quad (30)$$

$$\langle C_t \rangle = \langle C_q \rangle - \alpha_0^2 C_y^\alpha / 2, \quad (31)$$

$$\langle C_q \rangle = \frac{\pi \alpha_0^2}{4} [(a^\alpha)^2 + k^2 (a^{\hat{\alpha}})^2], \quad (32)$$

где

$$a^\alpha = 2[F(k) + kG(k)(a_0 - \frac{1}{2})], \quad (33)$$

$$a^{\hat{\alpha}} = 2\left[\frac{G(k)}{k} - F(k)(a_0 - \frac{1}{2}) - \frac{1}{2}\right]. \quad (34)$$

<sup>2</sup> В дальнейшем для сокращения записи знак выделения действительной части может опускаться.

Соответствующие зависимости мгновенных характеристик при чисто угловых колебаниях найдены в виде

$$C_y(t) = C_y^\alpha \alpha(t) + C_y^{\dot{\alpha}} \dot{\alpha}(t), \quad (35)$$

$$C_y^\alpha = 2\pi [F(k) + kG(k)(a_0 - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2}k^2 a_0], \quad (36)$$

$$C_y^{\dot{\alpha}} = 2\pi [\frac{G(k)}{k} - F(k)(a_0 - \frac{1}{2}) + \frac{1}{2}]; \quad (37)$$

$$m_{z_0}(t) = m_{z_0}^\alpha \alpha(t) + m_{z_0}^{\dot{\alpha}} \dot{\alpha}(t), \quad (38)$$

$$m_{z_0}^\alpha = -\pi \left[ F(k) + kG(k)(a_0 - \frac{1}{2}) + \frac{k^2}{8} \right], \quad (39)$$

$$m_{z_0}^{\dot{\alpha}} = -\pi \left[ \frac{G(k)}{k} - F(k)(a_0 - \frac{1}{2}) - \frac{1}{2} \right], \quad (40)$$

$$C_i(t) = C_q(t) - \alpha(t)[C_y^\alpha \alpha(t) + C_y^{\dot{\alpha}} \dot{\alpha}(t)], \quad (41)$$

$$C_q(t) = \frac{\pi}{2} (a^\alpha \alpha + a^{\dot{\alpha}} \dot{\alpha})^2 = \frac{\pi}{2} [(a^\alpha)^2 \alpha^2 + 2a^\alpha a^{\dot{\alpha}} \alpha \dot{\alpha} + (a^{\dot{\alpha}})^2 \dot{\alpha}^2], \quad (42)$$

или, альтернативно

$$C_q(t) = C_q^{\alpha\alpha} \alpha^2(t) + C_q^{\alpha\dot{\alpha}} \alpha(t)\dot{\alpha}(t) + C_q^{\dot{\alpha}\dot{\alpha}} \dot{\alpha}^2(t), \quad (43)$$

**Гармонический порыв**

При воздействии гармонического вертикального порыва  $w(x, t) = w_0 \cos k(t - x)$ ,

$$F_\varphi(x, t) = w_0 \exp ik(t - x), \quad (44)$$

$$\hat{F}_\varphi(x) = \exp(-ikx). \quad (45)$$

$$\hat{C}_y = 2\pi \{J_0(k)F(k) + J_1(k)G(k) + i[G(k)J_0(k) - F(k)J_1(k) - J_1(k)]\}, \quad (46)$$

$$\langle C_i \rangle = \langle C_q \rangle = \pi w_0^2 \{ [F(k)J_0(k) + G(k)J_1(k)]^2 + [G(k)J_0(k) - F(k)J_1(k) - J_1(k)]^2 \}, \quad (47)$$

где  $J_0(k), J_1(k)$ - функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка.

Заметим, что амплитудное значение вертикального скоса, обусловленного орбитальным движением жидкости, зависит от погружения крыла под свободную поверхность и может быть записано в виде

$$w_0 = \frac{a_w k_\lambda}{2k_n F \Gamma_h^2} \exp(-k_\lambda h), \quad (48)$$

где  $a_w$  - амплитуда волны в долях хорды,  $k_\lambda = 2\pi / \lambda_w$ ,  $\lambda_w$  - длина волны в долях хорды.

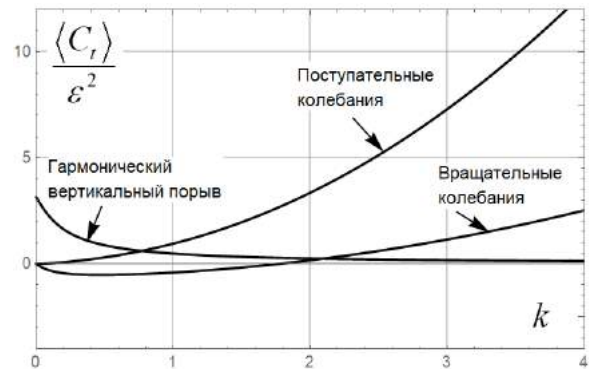


Рис. 1 Средний по периоду коэффициент силы тяги, отнесенный к квадрату безразмерной амплитуды нестационарного возмущения, в функции от числа Струхала

**Вертикально-угловые колебания**

Пусть профиль одновременно участвует в вертикальных и угловых колебаниях, заданных законами

$$h(t) = h_0 \cos kt, \alpha = \alpha_0 \cos(kt - \psi). \quad (49)$$

Заметим, что при такой записи,  $\psi > 0$  угловые колебания отстают от вертикальных.

Обратимся к определению коэффициентов мгновенной и осредненной по периоду силы тяги для рассматриваемого случая комбинированных вертикально-угловых колебаний.

$$C_i(t) = \frac{\pi}{2} [a^h \dot{h}(t) + a^{\dot{h}} \ddot{h}(t) + a^\alpha \alpha(t) + a^{\dot{\alpha}} \dot{\alpha}(t)]^2 - \alpha(t) [C_y^h \dot{h}(t) + C_y^{\dot{h}} \ddot{h}(t) + C_y^\alpha \alpha(t) + C_y^{\dot{\alpha}} \dot{\alpha}(t)]. \quad (50)$$

$$\langle C_i \rangle = \frac{\pi h_0^2 k^2}{4} [(a^h)^2 + k^2 (a^{\dot{h}})^2] + \frac{\pi \alpha_0^2}{4} [(a^\alpha)^2 + k^2 (a^{\dot{\alpha}})^2] + \frac{\alpha_0 h_0}{2} \{ k \sin \psi [C_y^h - \pi (a^h a^\alpha + k^2 a^{\dot{h}} a^{\dot{\alpha}})] + k^2 \cos \psi [ \pi (a^h a^\alpha - a^{\dot{h}} a^\alpha) + C_y^{\dot{h}} ] \} - C_y^\alpha \frac{\alpha_0^2}{2}, \quad (51)$$

Входящие в выражения для  $C_i(t)$  и  $\langle C_i \rangle$

производные  $a^h, a^{\dot{h}}, a^\alpha, a^{\dot{\alpha}}, C_y^h, C_y^{\dot{h}}, C_y^\alpha, C_y^{\dot{\alpha}}$  приведены выше.

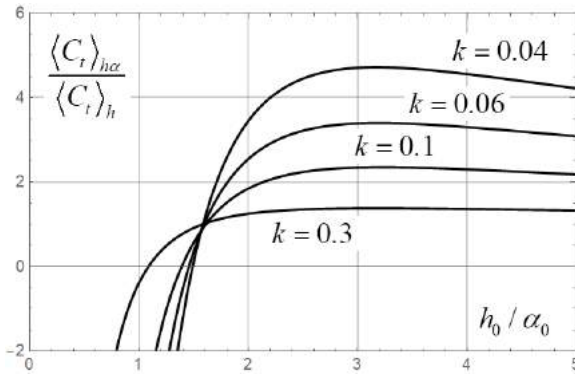


Рис. 2 Отношение среднего по периоду коэффициента силы тяги при вертикально-угловых колебаниях, отнесенный к среднему по периоду коэффициенту силы тяги при чисто вертикальных колебаниях для различных значений числа Струхала

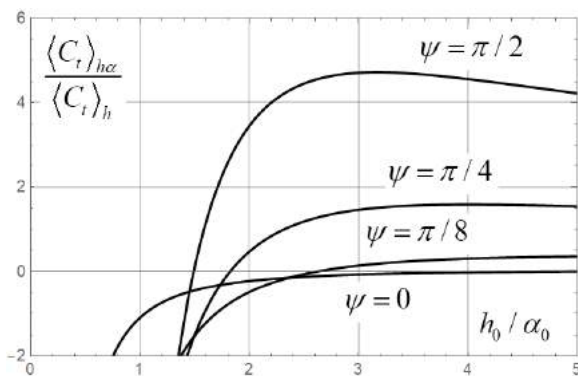


Рис. 3 Отношение среднего по периоду коэффициента силы тяги при вертикально-угловых колебаниях среднему по периоду коэффициенту силы тяги при чисто вертикальных колебаниях для различных значений фазового угла  $\psi$  и  $k = 0.04$

Анализ приведенных на Рис. 2 и Рис. 3 расчетных данных по смешанным колебаниям показывает, что существует диапазон отношения амплитуд и фазовых углов, для которого средняя тяга оказывается выше, чем для случая чисто вертикальных колебаний.

**Колебания крыла с угловой пружиной под воздействием вынужденных вертикальных колебаний**

Рассмотрим практически интересный случай крыла одновременно совершающего вынужденные вертикальные колебания и вызванные ими «упругие» угловые колебания, см. [6,7]. Пусть для упрощения упругая ось совпадает с осью вращения, а последняя находится в середине крыла. Тогда, в обозначениях данной статьи уравнение вызванных угловых колебаний в безразмерном виде можно привести к виду

$$\ddot{\alpha} + k_0^2 \alpha = \frac{1}{i_m} m_z, \tag{52}$$

где  $m_z = m_z^\alpha \alpha + m_z^\dot{\alpha} \dot{\alpha} + m_z^{\dot{h}} \dot{h} + m_z^{\ddot{h}} \ddot{h}$ ,

$k_0 = \omega_0 b / 2U_0$ ,  $\omega_0$  - собственная круговая частота угловой пружины,  $b$  - хорда крыла,

$i_m = 8I_m / \rho b^4$ ,  $I_m$  - момент инерции массы относительно середины крыла. Производные коэффициента продольного момента по кинематическим параметрам при вертикальных и угловых колебаниях приведены выше. Формулируя уравнение относительно  $\alpha(t)$ , перепишем (52) так

$$\ddot{\alpha} - \frac{m_z^\alpha}{i_m} \dot{\alpha} + (k_0^2 - \frac{m_z^\alpha}{i_m}) \alpha = \frac{1}{i_m} (m_z^{\dot{h}} \dot{h} + m_z^{\ddot{h}} \ddot{h}). \tag{53}$$

Принимая закон вынуждающих вертикальных колебаний в виде  $h(t) = h_0 \exp(ikt)$ , а искомым угловых колебаний в виде  $\alpha(t) = \alpha_0 \exp[i(kt - \psi)]$ , получим

$$\alpha_0 (k_0^2 - k^2 - \frac{m_z^\alpha}{i_m} - ik \frac{m_z^\alpha}{i_m}) \exp(-i\psi) = \frac{h_0}{i_m} (ikm_z^{\dot{h}} - k^2 m_z^{\ddot{h}}),$$

или, разделяя действительную и мнимую части,

$$\alpha_0 [(k_0^2 - k^2 - \frac{m_z^\alpha}{i_m}) \cos \psi - k \frac{m_z^\alpha}{i_m} \sin \psi] = -\frac{k^2 h_0}{i_m} m_z^{\ddot{h}},$$

$$\alpha_0 [(k^2 - k_0^2 + \frac{m_z^\alpha}{i_m}) \sin \psi - k \frac{m_z^\alpha}{i_m} \cos \psi] = \frac{k h_0}{i_m} m_z^{\dot{h}}.$$

Обозначая  $\chi = \alpha_0 / h_0$ , получим

$$\chi (a_1 \cos \psi + b_1 \sin \psi) = c_1, \tag{54}$$

$$\chi (b_1 \cos \psi - a_1 \sin \psi) = c_2, \tag{55}$$

Откуда

$$\tan \psi = \frac{b_1 c_1 - a_1 c_2}{c_1 a_1 + c_2 b_1}, \tag{56}$$

$$\chi = \frac{\alpha_0}{h_0} = \frac{\sqrt{(b_1 c_1 - a_1 c_2)^2 + (a_1 c_1 + b_1 c_2)^2}}{a_1^2 + b_1^2}. \tag{57}$$

В качестве примера на Рис. 4 приведены данные расчета отношения амплитуды  $\alpha_0$  угловых колебаний профиля с угловой пружиной, вызванных вынужденными вертикальными колебаниями с амплитудой  $h_0$  при различных значениях числа Струхала  $k_0 = \omega_0 b / 2U_0$ , составленного по собственной круговой частоте пружины.

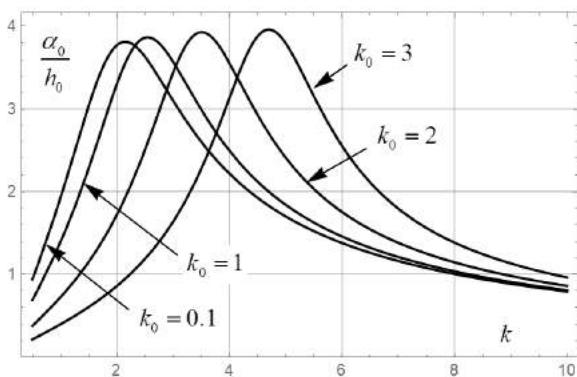


Рис.4. Отношение амплитуды  $\alpha_0$  вызванных упругих угловых колебаний профиля, совершающего вынужденные вертикальные колебания с амплитудой  $h_0$  ( $i_m = 0.8$ )

График показывает возможность резонансного возрастания амплитуды упругих колебаний, вызванных вынуждающими вертикальными колебаниями.

Изложенное решение позволяет найти параметры «упругих» угловых колебаний при заданных параметрах вертикальных колебаний, а далее рассчитать коэффициенты подъемной силы, продольного момента, мгновенной и средней тяги для вертикально-угловых колебаниях крыла с угловой пружиной.

### Заключение

1. В данной работе получены основные соотношения, позволяющие определить необходимые нестационарные характеристики крыльевых элементов в составе энергосберегающих движительных комплексов.

2. Приведенные результаты относятся к случаям вертикальных и угловых колебаний, а также к случаю воздействия гармонического порыва. Последний может действовать на подводный профиль вследствие орбитального движения жидких частиц, вызванного поверхностными волнами.

3. Приведенные формулы могут комбинироваться для рассмотрения одновременного влияния нескольких видов нестационарного движения, например при рассмотрении вертикально-угловых колебаний.

В частности, показано, что при определенном соотношении амплитуд и фазовых углов вертикальных и угловых колебаний, их комбинация обеспечивает значительное превышение средней за период тяги по сравнению со случаем чисто вертикальных колебаний.

4. Рассмотрен практически интересный случай угловых колебаний профиля, подверженного вынужденным вертикальным колебаниям при наличии угловой пружины. Выявлено возможное резонансное возрастание амплитуды «упругих» угловых колебаний.

### Литература

1. Некрасов А.И. Теория крыла в нестационарном потоке, изд-во АН СССР, Москва, 1947.
2. Yamaguchi H. and Bose N. Oscillating Foils for Marine Propulsion [Journal]. [s.l.] : Proceedings of the 4th International Offshore and Polar Engineering Conference in Japan, 1994.
3. Naito S. and Isshiki H. Effect of Bow Wings on Ship Propulsion and Motions [Journal]. [s.l. : Applied Mechanics Review, 2005. Vol. 58.
4. Рождественский К.В., Рыжов В.А. Математические модели в теории машущего крыла, ЛКИ, учебное пособие, Ленинград, 1983, 104 с.
5. Панченков А.Н. Теория потенциала ускорений. Новосибирск: Наука, 1975, 223 с.
6. Ростовцев Д.М., Рождественский К.В. Математическая модель обтекания машущего крыла с упругой связью, Труды ЛКИ, «Математическое обеспечение автоматизированных систем в судостроении», Ленинград, 1987,
7. Горелов Д.Н. Машущий полет при высокочастотных колебаниях крыла, Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа, 1984, №2, с. 154-158.

### References

1. Nekrasov A.I. Teoriya kryla v nestatsionarnom potoke, izd-vo AN SSSR, Moskva, 1947.
2. Yamaguchi H. and Bose N. Oscillating Foils for Marine Propulsion [Journal]. [s.l.] : Proceedings of the 4th International Offshore and Polar Engineering Conference in Japan, 1994.
3. Naito S. and Isshiki H. Effect of Bow Wings on Ship Propulsion and Motions [Journal]. [s.l. : Applied Mechanics Review, 2005. Vol. 58.
4. Rozhdestvenskiy K.V., Ryzhov V.A., Matematicheskiye modeli v teorii mashushego krila, LKI, Leningrad, 1983, 104 s.
5. Panchenkov A.N., Teoriya potentsiala uskorenyy. Novosibirsk: Nauka, 1975, 223 s.
6. Rostovtsev D.M., Rozhdestvenskiy K.V., Matematicheskaya model obtekaniya mashushego krila s uprugoi svyazyu, Trudy LKI, «Matematicheskoye obespecheniye avtomatizirovannykh system v sudostroeniyi», Leningrad, 1987, s. 39-47.
7. Gorelov D.N., Mashuschiy polet pri visokochastotnih kolebaniyakh krila, Izv. AN SSSR, Mehanika zhidkosti i gaza, 1984, №2, s. 154-158.

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

УДК:621.31.001.2:629.12

### **АНАЛИЗ УКРУПНЁННОГО И ДЕТАЛЬНОГО НОРМИРОВАНИЯ РАБОТ В СУДОСТРОЕНИИ И СУДОВОМ МАШИНОСТРОЕНИИ**

**Галина Валентиновна Герман**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии судового машиностроения  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лотцманская, 3  
тел. (812) 713-84-05 e-mail: germangalina@yandex.ru

#### **Аннотация**

На судостроительных предприятиях РФ возрождается машиностроительное производство с целью создания изделий машиностроения и снижения риска их поставок по межзаводской кооперации. Для обеспечения технологической подготовки производства (ТПП) в цехах-изготовителях судоверфи разрабатываются автоматизированные системы нормирования технологических процессов и операций на детальной основе, например, NS-Norm. В статье проанализированы достоинства и недостатки такого подхода. Безусловно, автоматизация проектирования технологических операций значительно повышает эффективность процесса. Однако, детальный подход обладает значительной систематической (методической) и случайной погрешностями и выполняется на завершающем этапе ТПП. Детальное нормирование с последующим суммированием результатов недопустимо использовать на ранних стадиях проектирования и ТПП получения достоверных укрупнённых оценок трудоёмкости и себестоимости любых работ.

В статье представлены методологические подходы разработки и реализации укрупнённых зависимостей, содержащих определяющие квалификационные характеристики судов и конструктивно-технологические параметры судового оборудования. Предложенный подход является универсальным и предлагается для получения параметрических и временных зависимостей оценки всех видов издержек судостроительного производства. Разработанные модели обеспечивают достоверную оценку и прогноз показателей, адекватных условиям производства с низкой погрешностью (5...12%), начиная с ранних этапов проектирования

**Ключевые слова:** систематические и случайные погрешности оценок в судостроении; определяющие конструктивно-технологические параметры судов и судового оборудования; статистические критерии; обеспечивающие достоверность и адекватность оценок показателей условиям производства, низкую погрешность, начиная с ранних этапов проектирования

### **ANALYSIS OF PRELIMINARY AND DETAILED NORMS SETTING OF WORKS IN SHIPBUILDING AND MARINE ENGINEERING**

**Galina V. German**

Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Shipbuilding Engineering Department of  
St. Petersburg State Maritime Technical University 190121, St. Petersburg, st. Lotsmanskaya, 3  
tel: +7 (812) 713-84-05, e-mail: germangalina@yandex.ru

#### **Abstract**

The shipyards of RUSSIA revives machinery production with a view to establishing engineering products and reduce the risk of their supply of inter-factory cooperation. To ensure the technological preparation of production (CCI) in workshops manufacturing shipyard on developed automated systems for regulation of technological processes and operations on a detailed basis, for example, NS-Norm. The article analyzes the advantages and disadvantages of such an approach. Of course, automation design of production operations considerably increases the efficiency of the process. However, a detailed approach has significant systematic (methodological) and random errors and run on the final stage of the CCI. Detailed regulation and then sum the results are not valid in the early stages of designing and obtaining reliable estimates consolidated CCI expenses and the cost of any works. The article presents the methodological approaches of the development and implementation of consolidated containing dependencies determining qualification characteristics of vessels and constructive-technological parameters of marine equipment. The proposed approach is generic and it is proposed to obtain a parametric and time dependencies evaluation of all costs of shipbuilding. Developed models provide reliable estimate and forecast indicators, adequate production conditions with a low margin of error (5 ... 12%) start shipbuilding; define constructive-technological parameters of ships and ship equipment; statistical criteria; to ensure the accuracy and adequacy of estimates of production conditions, low error, starting at the early staging from the early stages of design.



**Key words:** systematic and random error estimates in shipbuilding; define constructive-technological parameters of ships and ship equipment; statistical criteria; to ensure the accuracy and adequacy of estimates of production conditions, low error, starting at the early stage.

### Введение

В настоящее время многие судостроительные предприятия (верфи) с целью снижения риска поставок комплектующего оборудования по межзаводской кооперации (МЗК) специализированными предприятиями машиностроительного профиля взяли на себя решение задач проектирования и изготовления указанных изделий собственными силами. Поскольку машиностроительное производство возродилось или было вновь создано на судостроительных предприятиях, появилась необходимость создания систем автоматизированного нормирования технологических процессов изготовления деталей, сборки узлов и изделий машиностроения в цехах машиностроения, включая испытания готовой продукции, для её последующего использования в процессе монтажа на стапеле вновь строящегося или ремонтируемого судна. Примерами таких систем являются *troniks*, *NS-Norm* [1] и другие..

Анализ материалов автоматизированной программы нормирования *TS-Norm* [1, обеспечивающей детальное нормирование работ технологических процессов обработки и сборки узлов и изделий судового машиностроения показывает следующее:

- погрешность при использовании операционных норм времени в нормативных справочниках в виде матриц информации, - поправочных коэффициентов и/или расчётных зависимостей, включённых в базу данных [1,2,3, ], не приводится;

- нормирование технологических процессов выполняется на основе суммирования операционных норм времени.

Предлагаемый в *TS-Norm* подход, безусловно, актуален при проектировании технологических процессов, так как обеспечивает детальное нормирование при технологической подготовке производства (ТПП) в цехах- исполнителях работ.

При определении трудоёмкости по укрупнённым видам (подвидам) работ, по технологическим переделам, при решении задач оптимизации (выравнивания) загрузки работами, когда ещё отсутствуют результаты детального нормирования технологических процессов и операций, такой подход представляется неприемлемым.

Более того, методика суммирования детальных составляющих в процессе определения суммарных значений трудоёмкости строительства судна в целом, включая укрупнённые виды работ, приводит к появлению значительной методической погрешности, и указанные оценки никогда не совпадут, что объективно обусловлено методическим подходом в системе детального нормирования..

В процессе проектирования нового судового оборудования, когда необходимы оценки технологичности вновь создаваемых изделий применительно к условиям производства,

использование детальных усреднённых операционных нормативов трудоёмкости также **не оправдано**. Вот почему необходимы новые подходы укрупнённого нормирования всех видов и подвидов работ для любых изделий, изготавливаемых предприятием, оценку которых можно получить, начиная с ранних этапов проектирования и ТПП.

### 1. Особенности нормирования трудоёмкости на основе укрупнённого подхода

Укрупнённые нормативы трудоёмкости для судовых заказов, изготовления деталей, сборки узлов, агрегатированных сборочно-монтажных единиц судового оборудования, монтажа судового оборудования на судне предложено получать на основе математических зависимостей, содержащих определяющие классификационные характеристики судов, технические, конструктивно-технологические параметры деталей, узлов, изделий судового оборудования, начиная с ранних этапов проектирования.

**Определяющие параметры** – это такие, которые наиболее прямым и тесным образом (линейно или нелинейно) связаны с выбранными показателями (трудоёмкости, стоимости, материалоемкости, энергоёмкости) выполнения работ. Значения показателей трудоёмкости выполненных работ по ранее построенным судовым заказам могут быть определены по предыдущему ретроспективному периоду (5 ...7 лет).

Методически укрупнённый подход в получении оценок трудоёмкости предусматривает разработку математических зависимостей, которые должны содержать определяющие конструктивно-технологические параметры судов и судового оборудования, известные, начиная с ранних этапов проектирования и ТПП. Кроме того, разработанные математические зависимости должны удовлетворять статистическим критериям несмещённости, эффективности, статистической значимости. Параметрический и временной подход в оценке искомых показателей для любого этапа технической подготовки производства и выполнения работ позволяет получать достоверный временной прогноз [5, 6]. Разработка и внедрение укрупнённых зависимостей оценки трудоёмкости по результатам диссертационных исследований на соискание учёной степени к.т.н. Юрьевым О.Ю. (2005 г., автор статьи – научный руководитель диссертации) позволило заменить работу сектора технологов - нормировщиков одним подготовленным специалистом [4].

Выпускником СПбГМТУ Беляевым В.А. (2014 г.) в выпускной квалификационной работе под руководством автора статьи разработаны нормативы оценки трудоёмкости изготовления деталей типа «Корпус» для условий завода «Двигатель» (СПб), что позволило названному предприятию расширить и использовать технически обоснованные нормативы трудоёмкости применительно к условиям конкретного производства.

Как показали дальнейшие исследования, использование укрупнённого подхода в нормировании судостроительных, машиностроительных работ позволяет разрабатывать укрупнённые регрессионные зависимости оценки трудоёмкости различных видов (подвидов) работ, технологических переделов, ТТН, ТН, организационно-технологических схем работ, технологических процессов и операций на основе фактических затрат труда, указанных в техкомплектах, бригадокомплектах, подкомплектах, планово-учётных единицах, маршрутных и операционных картах, Фактические затраты труда позволяют учесть условия производства работ, а достоверность, значимость и низкая погрешность оценок обеспечивается за счёт использования нового методического подхода погрешность оценки обеспечивается за счёт инновационного (укрупнённого) методического подхода.

**2. Теоретические основы анализа и синтеза математических моделей трудоёмкости на основе укрупнённого подхода**

Из всех видов затрат судостроительного, машиностроительного, электромонтажного и других видов производств теоретические выработки укрупнённых зависимостей.

Новы методические подходы[5,6] представлены на основе использования показателей трудоёмкости, наиболее полно отражающих процессы состояния и

эволюционного развития производства. Многочисленными исследованиями показано [ 6], что аналогичные закономерности имеют место для других видов затрат, и предлагаемые подходы могут быть использованы для их оценки и прогноза на достоверной основе. Продолжительность производственных процессов – характеристика планирования работ.

Исходная информация (БД) для расчёта регрессионных зависимостей оценки показателей трудоёмкости имеется на предприятиях в конструкторской, технологической, плановой, финансовой и другой документации по ранее выполненным работам в процессе строительства судовых заказов, включая выполнение любых видов (подвидов) работ.

*2.1. Анализа связей показателей технологической трудоёмкости с классификационными, конструктивно-технологическими параметрами и особенностями судов и судового оборудования*

*2.1.1. Составление таблицы исходных данных.*

Форма таблицы исходных данных представлена на рис.1.

Номер объекта наблюдения (i)	Значения показателей технологической трудоёмкости технологических процессов и операций обработки, сборки, производственных процессов монтажа оборудования на судне, выполнения достроечных и сдаточных работ и их составляющих					Значения классификационных, конструктивно-технологических параметров (КТП) судов и судового оборудования, включая изделия судового машиностроения			
	$y_{\Sigma}$	$y_1$	$y_2$	...	$y_m$	$x_1$	$x_2$	...	$x_k$
1									
2									
3									
...									
n									

Рис.1 Форма таблицы исходных данных.

$y_{\Sigma}, y_1, y_2, \dots, y_m$  – значения технологической трудоёмкости работ, нормо-ч;  $y_{\Sigma} = y_1 + y_2 + \dots + y_m$ ;  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$  – значения КТП (в физических величинах или принятых числовых кодах).

Требования к заполнению таблицы исходных данных: таблица должна иметь полный ранг, т.е. не иметь пропусков данных. Интерполяция и экстраполяция данных не допускается; номенклатура КТП, включённых в таблицу, не ограничивается; декомпозиция показателей трудоёмкости определяется потребностью в получении оценок.

**2.1.2. Расчёт значений парных коэффициентов корреляции**

Значения парных коэффициентов корреляции показывают наличие и степень тесноты статистической линейной (нелинейной) связи, что положено в основу выдвижения гипотез о виде математических моделей оценки показателей технологической трудоёмкости от значений КТП,

включая временной параметр (начало, окончание и продолжительность строительства судового заказа).

Расчёт значений парных коэффициентов корреляции в общем виде выполняется по формуле:

$$r_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (1)$$

где:



исходных данных (БД) (рис.1) заполнена данными производственных, технологических процессов, операций любых видов работ конкретного предприятия за определённый ретроспективный период.

Достоверность рассчитанных моделей, содержащих определяющие параметры [6], известные на момент получения оценок, должна быть подтверждена соответствием статистическим критериям [7].

Для решения сформулированной задачи и оценки правильности расчётов автором предложен дополнительный критерий [6, 7, ]:

$$\sum i(y_i) = \sum i(\hat{y}_i), \quad (15)$$

когда оценивается совпадение суммарных результатов оценок показателей трудоёмкости по таблице наблюдений с результатами использования модели.

Выполняется расчёт и анализ остатков по критериям (11), (12) с построением и анализом вида графиков остатков, представляющего неучтённую случайную погрешность с оценкой эффективности модели по виду графика остатков и расчётному значению среднеквадратичного отклонения остатков от среднего арифметического (13), (16)

Графики остатков:  $e_i(y_i)$  – общий;  
 $e_i(\hat{Y}_i)$  – от расчётного значения;  
 $e_i(x_i)$  – от параметра.

Возможные виды графиков остатков представлены на рис 2 и 3. График остатков – точечный, заштрихованное поле – расположение точек графика остатков.

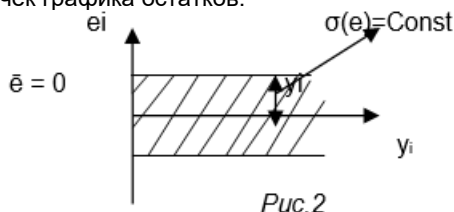


График остатков (рис.2) не выявляет отклонений от нормального поведения ошибки. С увеличением значения прогнозируемого показателя, случайная погрешность прогноза не увеличивается ( $\sigma[e] = \text{Const}$ ).

Проверка эффективности, выполняемая по графику остатков, заключается в расчёте и установлении требования (20):

$$\sigma[e] = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1}} = \text{Const}; \quad (16)$$

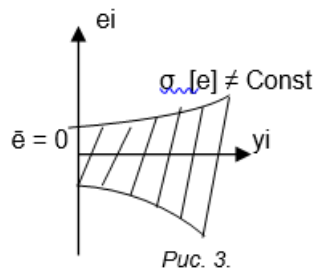


График остатков на рис. 3 выявляет отклонения от нормального поведения ошибки, и модель требует корректировки. Это - сложная творческая задача, решаемая с возвратом и анализом исходных данных, предложением новых нелинейных моделей [7,8], повторным расчётом, и проверкой соответствия статистическим критериям.

### 2.1.5. Оценка погрешности использования рассчитанной (разработанной) модели

Включает:

- расчёт значения множественного коэффициента корреляции (для линейных регрессионных моделей) или значения корреляционного отношения (для нелинейных регрессионных моделей);
- расчёт значения погрешности предсказания при использовании модели;
- оценивается статистическая значимость модели по критерию Фишера.

Расчет значения множественного коэффициента корреляции для разработанных линейных моделей вида (5) определяется зависимостями:

$$R = \sqrt{\frac{SS_{регр}}{SS_{общ}}} \quad (17)$$

$$SS_{регр} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (18)$$

$$SS_{общ} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (19)$$

$0,8 \leq R \leq 1,0$  для значимых моделей оценки.

Погрешность использования линейных моделей вида (2), одно- и многопараметрических, представляет систематическую методическую (постоянную) погрешность

$$\delta = 1 - R \quad (20)$$

Для однопараметрических линейных моделей

$$R = r_{yx} \quad (21)$$

Это условие предлагается как дополнительная проверка результатов расчёта указанных моделей.

### 2.1.6. Уточнение оценки корреляционного отношения для нелинейных зависимостей

Значение корреляционного отношения предложено только для нелинейных моделей с целью определения погрешности их использования в конкретных условиях производства [10].

Корреляционное отношение для нелинейных моделей определяется на основе зависимостей:

$$\rho_1 = \sqrt{1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_{y^2}}}, \quad (22)$$

где:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\hat{y}_i - y_i)^2}{n-1}}, \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{n-1}}, \quad (23)$$

$y_i$  - фактическое значение трудоёмкости, нормо-ч (определяется по таблице исходных данных);

$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$  среднее значение трудоёмкости, нормо-ч, рассчитанное по таблице исходных данных;  
 $\hat{y}$  - расчётное значение трудоёмкости, полученное при использовании разработанной модели;

Для значимых нелинейных зависимостей значение  $\rho_1$  по утверждению [10] должно быть близко к «1». Исследования, выполненные автором, показывают, что такой подход недостаточен при получении оценок производственных и технологических процессов и требует уточнения [11].

### 2.1.7. Расчет статистической значимости модели на основе критерия Фишера

Расчётное значение функции плотности вероятности распределения Фишера для рассчитанной модели определяется выражениями:

$$F_{расч.} = \frac{MS_R}{S^2}; \quad (24)$$

$$MS_R = \frac{SS_{перп.}}{p}; \quad (25)$$

$p = 1, 2, 3$  - число параметров в одно- и многопараметрических моделях вида (2), (3), (5);  
 $SS_{перп.}$  - см. (18);  $n$  - число наблюдений.

$$S^2 = \frac{SS_{общ.} - SS_{перп.}}{(n-2p)}; \quad (26)$$

$SS_{общ.}$  - см. (19);  $q = 0,01; (0,05)$ ;  $q$  - уровень значимости (вероятности совершить ошибку 1-го рода);

$k_1$  - число степеней свободы числителя;

$k_2$  - число степеней свободы знаменателя;

$$F_{расч.} \geq F_{табл. q, k_1=p; k_2=n-2p} - (27)$$

- критерий статистической значимости модели - критерий Фишера.

$$S^2 = \frac{SS_{общ.} - SS_{перп.}}{n-2p}; \quad (26)$$

$SS_{общ.}$  - см. (19);  $q = 0,01; (0,05)$ ;  $q$  - уровень значимости (вероятности совершить ошибку 1-го рода);

$k_1$  - число степеней свободы числителя;

$k_2$  - число степеней свободы знаменателя;

$$F_{расч.} \geq F_{табл. q, k_1=p; k_2=n-2p} - (27)$$

- критерий статистической значимости модели - критерий Фишера

$F_{табл.}$  - определяется по справочным таблицам [10].

Если рассчитанная модель удовлетворяет всем статистическим критериям (11), (12), (13), (14), она обеспечивает достоверную оценку выбранного показателя, адекватна условиям производства работ, при использовании модели обеспечивается низкая погрешность оценки, начиная с ранних этапов технической подготовки производства.

### Заключение

Предложенный новый методологический подход в получении укрупнённых оценок показателей производственных и технологических процессов позволяет создать «дерево оценок трудоёмкости» в судостроении, начиная с укрупнённых до детальных, достоверных и адекватных условиям производства. Использование названного подхода обеспечивает:

1. Значительное снижение погрешности при использовании моделей, которая достигается за счёт усреднения оценок, полученных на пересекающемся множестве определяющих параметров [5,6].

2. Трудозатраты по разработке и внедрению укрупнённого подхода в нормировании на порядок меньше аналогичных работ при внедрении системы TS-Norm.

3. Результаты работ по разработке укрупнённых нормативов и оценок трудоёмкости прошли апробацию и широко реализованы в судостроительной и других отраслях промышленности.

### Литература

1. А.Н.Муравьёв, А.П.Бояров, В.А.Красиков. Программная система TS-Norm. Международная научно-техническая конференция «75 лет на рубеже передовых технологий» 15-16 октября 2014 г. Сборник трудов конференции. Санкт-Петербург. ОАО «ЦТСС», 2014 г. 7 с.
2. А.Г.Суслов, А.М.Дальский. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроения, 2008 г. 688с.
3. Слесарно-монтажные операции при постройке надводных судов. Нормативы времени. Мелкосерийное и серийное производство. 74-0303-248-87. 54 с.
4. Юрьев О.Ю. Разработка и реализация системы укрупнённых нормативов по труду в процессе строительства судов на ПО «Алмаз». Диссертация на соискание учёной степени к.т.н. СПб. 2005 г. 232 л.
5. Герман Г.В. Разработка и реализация при проектировании требований монтажной технологичности комплексов электрооборудования судов. Диссертация на соискание учёной степени к.т.н. СПб. 1988 г. 191 л.
6. Герман Г.В. Методология управления технологией монтажа судового электрооборудования. Диссертация на соискание учёной степени д.т.н.. СПб. 2003 г. 338 л.
7. Герман Г.В., Черненко В.И. Резник Б.Л., Черкас Д.Д. Расчётно-аналитические методы и их использование при решении задач технологической подготовки машиностроительного и судостроительного производств. Учебное пособие. РИО СПбГМТУ, СПб. 2015 г., 63 с.
8. И.Н.Бронштейн, К.А.Семендяев. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов (с.578-584). М.: Гос. из-во технической литературы, 1951 г. 608 с.
9. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. Энергия. Ленинградское отделение. 1978 г. 204 с.

10. Тимофеева А.А. Матричная модель прогнозирования издержек производства на электромонтажные работы в судостроении. Диссертация на соискание учёной степени к.э.н. СПб, 1998 г. 120 л.
11. Герман Г.В. Новые методологические подходы в получении оценок показателей и параметров производственных и технологических процессов в судостроении. Морские интеллектуальные технологии Т1 1(43), 2019 г. с.
12. Н.Дрейпер, Г.Смит. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1987 г. Книга 1- 368 с., Книга 2 -352 с.

#### References

1. Murav'yov A.N., Boyarov A.P., Krasikov V.A. (2014). Programmnaya sistema TS-Norm. Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya «75 let na rubezhe peredovyh tekhnologij». Sbornik trudov konferencii. Sankt-Peterburg. ОАО «СТСС», pp.445-451
2. Suslov A.G., Dal'skij A.M. (2008). Nauchnye osnovy tekhnologii mashinostroeniya. M.: Mashinostroeniya, 688p.
3. Slesarno-montazhnye operacii pri postrojke nadvodnyh sudov. Normativy vremeni. Melkoserijnnoe i serijnnoe proizvodstvo (1987) 74-0303-248-87. 54p.
4. YUr'ev O.YU. (2005). Razrabotka i realizaciya sistemy ukрупnyonnyh normativov po trudu v processe stroitel'stva sudov na PO «Almaz». Dissertaciya na soiskanie uchyonoy stepeni k.t.n. SPb. 232p.
5. German G.V. (1988). Razrabotka i realizaciya pri proektirovanii trebovanij montazhnoj tekhnologichnosti kompleksov ehlektrooborudovaniya sudov. Dissertaciya na soiskanie uchyonoy stepeni k.t.n. SPb. 191p.
6. German G.V. (2003) Metodologiya upravleniya tekhnologiej montazha sudovogo ehlektrooborudovaniya. Dissertaciya na soiskanie uchyonoy stepeni d.t.n. SPb 338p.
7. German G.V., Chernenko V.I., Reznik B.L., Cherkas D.D. (2015) Raschyotno-analiticheskie metody i ih ispol'zovanie pri reshenii zadach tekhnologicheskoy podgotovki mashinostroitel'nogo i sudostroitel'nogo proizvodstv. Uchebnoe posobie. RIO SPbGMTU, SPb. 63p.
8. Bronshtejn I.N., Semendyaev K.A. (1951). Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchihsya vtuzov M.: Gos. iz-vo tekhnicheskoy literatury, 608p.
9. Rabinovich S.G. (1978). Pogreshnosti izmerenij. EHnergiya. Leningradskoe otdelenie. 204p.
10. Timofeeva A.A. (1998) Matrichnaya model' prognozirovaniya izderzhhek proizvodstva na ehlektromontazhnye raboty v sudostroenii. Dissertaciya na soiskanie uchyonoy stepeni k.eh.n. SPb, 120p.
11. German G.V. (2019) Novye metodologicheskie podhody v poluchenii ocenok pokazatelej i parametrov proizvodstvennyh i tekhnologicheskikh processov v sudostroenii. Morskie intellektual'nye tekhnologii T1 , 1(43), p.
12. Drejper N., Smit G. (1987). Prikladnoj regressionnyj analiz. M:Finansy i statistika, Kniga 1 368p., Kniga 2 352 p



УДК:621.317.288:65.112.022

## НОВЫЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ В ПОЛУЧЕНИИ ОЦЕНОК ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СУДОСТРОЕНИИ

**Галина Валентиновна Герман**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии судового машиностроения  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
тел. (812) 713-84-05 e-mail: germangalina@yandex.ru

### Аннотация

В статье отражены результаты многолетнего опыта получения оценок показателей и параметров производственных и технологических процессов в судостроении. Этот процесс теоретически значительно отличается от процесса измерения физических величин в метрологии. Определён состав систематических (методических) погрешностей, причины их появления, характер изменения и методы оценки. Предложен корреляционно-регрессионный анализ и синтез математических моделей оценки, позволяющие обеспечить достоверность при решении любых задач конструкторско-технологической подготовки производства. Выполнен анализ причин появления и методы уменьшения или устранения случайных погрешностей. Особое внимание уделено объединению множества достоверных моделей для оценки одного показателя с целью значительного сокращения систематических и случайных погрешностей, начиная с ранних этапов проектирования. В качестве параметров моделей предложено использовать те, которые известны на соответствующем этапе принятия решения. Теория разработки достоверных моделей (параметрических и временных) дополнена новым подходом в трактовках физической сущности и оценок множественного коэффициента корреляции, корреляционного отношения и суммарной погрешности любых оценок при объединении различных моделей. Новый методологический подход и его реализация в судостроении позволяют повысить не только точность текущих оценок показателей, но и обеспечить достоверный временной прогноз на изменяющуюся перспективу строительства судов.

**Ключевые слова:** систематическая и случайная погрешность оценок в судостроении; графики остатков; множественный коэффициент корреляции; корреляционное отношение

## NEW METHODOLOGICAL APPROACHES IN OBTAINING ESTIMATES OF INDICATORS AND PARAMETERS OF PRODUCTION AND ENGINEERING PROCESSES IN SHIPBUILDING

**Galina V. German**

Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Shipbuilding Engineering Department of  
St. Petersburg State Maritime Technical University 190121, St. Petersburg, st. Lotsmanskaya, 3  
tel: +7 (812) 713-84-05, e-mail: germangalina@yandex.ru

### Abstract

The article presents the results of many years of experience of getting estimates and parameters of production and technological processes in shipbuilding. This process theoretically differs significantly from the process for measuring physical quantities in metrology. Determined the composition of systematic (methodological) errors, the causes of their occurrence, the nature of the change and the methods of evaluation. Proposed correlative-regression analysis and synthesis of mathematical valuation models to ensure accuracy in solving any problems of design and technological preparation of production. Analysis of causes of and methods for reducing or eliminating The article presents the results of many years of experience of getting estimates and parameters of production and technological processes in shipbuilding. This process theoretically differs significantly from the process for measuring physical quantities in metrology. Determined the composition of systematic (methodological) errors, the causes of their occurrence, the nature of the change and the methods of evaluation. Proposed correlative-regression analysis and synthesis of mathematical valuation models to ensure accuracy in solving any problems of design and technological preparation of production. Analysis of causes of and methods for reducing or eliminating random errors. Particular attention is paid to the interconnection of multiple reliable models for assessment of one measure to reduce s. As the parameters of the models suggested that those which are known at the appropriate stage of decision-making. Theory of the development of reliable models (parametric and temporary) supplemented by a new approach in the interpretations and evaluations of the physical essence of multiple correlation coefficient, correlation relationships and total error of any evaluation the grouping of the various models. New methodological approach and its implementation in shipbuilding can improve not only the accuracy of current estimates, but also provide accurate temporal prediction for the changing perspective of the construction of ships.

**Key words:** systematic and random error estimates in shipbuilding; residual charts; multiple correlation coefficient; correlation.

### Введение

Анализируя публикации в многочисленных научно-технических изданиях по технологии судостроения, судового машиностроения, судовых электромонтажных работ и т.д., а также существующую систему нормирования трудовых, денежных, материальных, энергетических издержек производства, практически в большинстве случаев сталкиваешься с отсутствием обоснования и оценок погрешностей при использовании приведённых значений производственных и технологических показателей, как в абсолютном, так и в относительном их выражении, включая предлагаемые модели оценки. В этих случаях достоверность и обоснованность рекомендованных решений, полученных на основе таких оценок, остаётся без подтверждения. Для повышения эффективности производства, снижения импортозависимости, повышения производительности труда, качества производимой продукции, снижения сроков

Вместе с тем в теории измерений физических величин [1] установлено, что при измерении любой физической величины, являющейся, по своей сути, случайной, имеют место как систематические, так и случайные погрешности, вызванные различными факторами. В современных условиях, когда многомерные многопараметрические и многовариантные системы планирования и управления судостроительным производством подвержены влиянию множества внешних и внутренних факторов, следует рассматривать их как большие технические системы (БТС), процессы и объекты (изделия производства), эффективно управлять созданием которых невозможно без количественных оценок показателей и целевых функций с учётом производственных ограничений, детерминированных и стохастических. То есть необходимо рассматривать значения всех оцениваемых показателей на основе известных параметров, как значения случайных величин, оценка которых также содержит систематическую и случайную погрешности. При этом, если решения (мероприятия, операции) по обеспечению повышения эффективности производства принимаются даже на основе количественной оценки, но методом PERT, достоверность такой оценки не всегда будет обеспечена, тем более, при этом, как правило, не приводится погрешность принятых оценок. Вот почему настоящая статья посвящена вопросам **оценок** показателей производственных и технологических процессов в судостроении, судовом машиностроении и других видах судостроительных производств.

Создание сложных наукоёмких объектов морской техники [2] требует системного подхода [3], а декомпозиция БТС (производственного процесса или объекта - сложной морской техники) на составляющие зависит от целевой функции (подфункций), в качестве критерия которых часто используются заданные значения оцениваемых показателей.

В статье предлагается рассмотрение новых методологических подходов в выявлении причин

появления и методов оценки и уменьшения (устранения) систематических и случайных погрешностей показателей производственных и технологических процессов, в отличие от положений теории измерений физических величин.

Производство сложных наукоёмких изделий морской техники, судов, кораблей, платформ для добычи углеводородов в прибрежных шельфах и открытых акваториях морей, автономных энергетических и опреснительных установок и т.д. требует создания математических моделей, как самих объектов, так и процессов технической подготовки их производства на системной основе. Реализация такого подхода невозможна без создания системы оценок показателей, комплексных и частных, достоверных и, адекватных условиям производства работ, обеспечивающих заданную точность оценки.

В этой связи важное значение приобретает группирование издержек производственной деятельности по их центрам затрат (сфер проявления) [4], а управление ими становится эффективным, когда принимаются решения, затрагивающие изменения показателей. В судостроении такие процессы соответствуют затратам на техническую подготовку производства и выполнение работ. А принятие решений соотносится с ранними этапами проектирования (конструкторской (КПП) и технологической подготовки производства (ТПП)), когда необходимо достоверно прогнозировать будущие издержки и оценивать выполнимость работ по строительству заказа [5,6]. Основным показателем эффективности судостроительного производства и всех его составляющих, определяемых планированием и управлением производством, является достижение целевой функции строительства конкурентоспособных судов. Остальные издержки могут быть определены на основе связей денежных, материальных и энергетических затрат с показателем трудоёмкости и конструктивно-технологическими параметрами судов и судового оборудования.

Под систематической погрешностью следует понимать неисклѳченный остаток оценок, если им нельзя пренебречь. Иногда неисклѳченные остатки систематических погрешностей относят к случайным, так как их значения неизвестны [1].

Систематические погрешности различают: по источникам; по свойствам. Источниками систематических погрешностей являются: метод измерений (оценок); средства измерений; личные особенности оператора, выполняющего измерения. Вот почему следует различать систематические погрешности: методические; инструментальные; личностные.

Методические погрешности возникают из-за несовершенства метода оценки, из-за ограниченной точности формул, описывающих процесс и/или объект, влияния средств измерений на объект, свойства которого оцениваются.

Инструментальные систематические погрешности вызваны несовершенством средств измерений (по

классу точности, из-за динамических изменений свойств средств измерений под влиянием различных факторов).

**Личностные** – внесение ошибок при формировании исходной БД, использование недопустимых расчётных зависимостей при использовании ПО.

Различают постоянные систематические погрешности и систематические погрешности, закономерно изменяющиеся: прогрессирующие, периодические, изменяющиеся по линейному или сложному законам.

### 1. Анализ систематических погрешностей оценок в судостроении

При получении оценок в производственных и технологических процессах в судостроении, судовом машиностроении, судовом электромонтажном производстве имеют место следующие виды систематических погрешностей: методические, обусловленные методами получения оценок; инструментальные, возникающие при использовании средств измерений параметров технологических процессов и операций; дополнительные динамические погрешности; установочные погрешности; систематические погрешности, связанные с индивидуальными особенностями лица, выполняющего оценку (нормирование).

Систематическая погрешность, постоянная, остаётся неизменной при каждой оценке, соответствует методу получения оценки; инструментальная погрешность постоянная для поверенного средства измерений, определяется классом точности этого средства в процессе выполнения контрольных операций.

Дополнительные динамические погрешности свидетельствуют о наличии изменяющегося во времени фактора (ов) производства, влияющего (щих), например, на точность обрабатываемой детали (см. п. 2.1. [7] – износ режущего инструмента).

Прогрессирующие (убывающие или возрастающие) погрешности оценок, определяются наличием методических погрешностей и выявляются при построении графиков остатков [7], демонстрирующих так называемый «уход» случайной ошибки. При этом рассчитанная модель перестаёт удовлетворять сформулированным статистическим критериям [9] и требует корректировки.

Установочные систематические погрешности (нулевые погрешности) определяются, когда оцениваемый показатель (в модельном отражении процесса или объекта) зависит от нулевых значений параметров, использованных для его оценки. В теории измерений физических величин такая погрешность устраняется за счёт введения дополнительных аппаратных компенсаторов в схему измерений [1]. В процессах технической подготовки производства появление такой погрешности обусловлено значительной систематической методической погрешностью за счёт использования системы оценок, не адекватной указанным процессам и объектам.

В получении оценок производственных и технологических процессов, безусловно, имеют место постоянные систематические погрешности,

получаемые на одной и той же методической основе [1,3].

### 2. Методы обнаружения систематических погрешностей

#### 2.1. Обнаружить систематические погрешности предложено следующим образом [7]:

- оценкой однородности массивов исходной информации (БД);
- использованием корреляционно-регрессионного анализа и синтеза достоверных математических моделей, адекватных оцениваемому процессу и/или объекту производства;
- всесторонним (доступным по имеющейся информации) факторным анализом для выявления связей между искомым показателем и определяющими параметрами, включая, при необходимости, достоверный прогноз недостающих параметров на ранних этапах проектирования;
- оцениванием границ в виде доверительных интервалов, в том числе с учётом параметров распределений оценок;
- обязательной проверкой соответствия разработанных моделей оценки, адекватных процессу и/или объекту, по статистическим критериям несмещённости, эффективности и состоятельности.

### 3. Случайные погрешности оценок

Случайные погрешности оценок возникают по следующим причинам: наличия порогового несоответствия между моделью объекта и самим объектом; наличия небольших, оцениваемых как допустимые (допуски) колебаний значений конструктивно-технологических параметров (КТП) изделий; ограничений возможностей органов чувств нормировщиков; наличия случайных погрешностей у применяемых средств измерений; наличие грубых выбросов исходных данных.

#### 3.1. Методы выявления и сокращения случайных погрешностей оценок включают:

- проверку однородности наблюдений (БД), полученных в различных условиях выполнения оценок с проверкой допустимости отличий средних квадратичных и средних арифметических в соответствии с [8];
- выявление и устранение грубых выбросов при их обнаружении [7] за счёт корректировки исходной статистики;
- проверку стационарности относительных оценок составляющих трудоёмкости;
- многократность оценок с последующей статистической обработкой полученных данных на основе пассивного статистического эксперимента с установлением закона распределения случайных величин и активного статистического эксперимента на основе корреляционно-регрессионного анализа и синтеза (с разработкой достоверных математических моделей оценки);
- выявление определяющих параметров и факторов производства, в наибольшей степени влияющих на оцениваемый показатель [6,7].

3.2. Способы описания случайных погрешностей:

Условия получения оценок для описания случайных погрешностей должны быть одинаковы, что достигается проверкой однородности массивов исходных данных и проверкой отсутствия грубых выбросов в соответствии с [7].

Способ описания случайных погрешностей базируется на:

- установлении принадлежности к равномерному или нормальному закону распределения с дальнейшим использованием параметров распределения;
  - оценкой случайной погрешности по графику остатков при использовании корреляционно-регрессионного анализа и синтеза моделей [7].
- Случайные погрешности по составляющим принято не выделять [1, 3].

4. Объединение результатов оценок при наличии систематических и случайных погрешностей

Пусть одна и та же случайная величина  $\check{T}_k$  (например, значение трудоёмкости строительства судна) оценивается несколькими методами (с применением нескольких моделей ( $j=1,2,\dots,L$ ):  $T^{\wedge}_j$ , достоверных, значимых и адекватных условиям производства, каждая из которых имеет систематическую погрешность  $\delta_{kj}$  [1]:

$$\check{T}_{kj} = T^{\wedge}_{kj} - \delta_{kj}, \quad (1)$$

где  $\check{T}_{kj}$  – оценка значения, полученного на основе использования  $j$ -тых расчётных модели;  $k$  – порядковый номер работ (судостроительных) в общем массиве оценок. Естественная интуитивная оценка истинного значения оцениваемой величины [1]

$$\check{T}_k = \frac{\sum_j^L T^{\wedge}_{kj}}{L} - \frac{\sum_j^L \delta_{kj}}{L}. \quad (2)$$

Для того, чтобы получить наиболее точную оценку  $\check{T}_k$ , необходимо располагать информацией о погрешностях:

оценке границ систематической погрешности  $\theta(\check{T}_k)$ :

$$\theta(\check{T}) = k \sqrt{\sum_j^L (g_j^2 * \delta_j^2)}; \quad (3)$$

оценке дисперсии отклонения  $S(\check{T})$ :

$$S(\check{T}) = \sum_j^L (g_j^2 * S_j^2), \quad (4)$$

где  $k$  – поправочный коэффициент, зависящий от распределения  $\theta(\check{T})$ , - равномерного или нормального;  $g_j$  – весовые коэффициенты в (3) и (4);  $\delta_j$  - значение систематической погрешности  $j$ -той модели, полученное в расчетах в соответствии с [7];  $S_j$  - среднеквадратичное отклонение  $T^{\wedge}_k$

Допустим, что систематические методические погрешности оценок  $\delta_j$  имеют равномерное распределение, тогда их среднеквадратичное отклонение [1]:

$$\sigma_j = \frac{\delta_j}{\sqrt{3}}; \quad \sigma_j^2 = \frac{\delta_j^2}{3}. \quad (5)$$

Значения условных весовых коэффициентов для каждой из рассчитанных зависимостей:

$$g_j' = \frac{1}{\sigma_j^2} = \frac{3}{\delta_j^2}. \quad (6)$$

При этом необходимо определить значение  $\sum_j^L g_j'$  [1].

Значения весовых коэффициентов:

$$g_j = \frac{g_j'}{\sum_j^L g_j'} \quad (7)$$

Тогда  $\check{T}_k = \sum_j^L [T^{\wedge}_{kj} * g_{kj}]$ , (8)

где  $k$  – порядковый номер оцениваемого показателя производственного или технологического процесса в общем массиве оценок.

Если распределения  $\delta_j$  носит нормальный характер, то согласно методике [1]:

$$\sigma_j = k \sqrt{\frac{\delta_j^2}{n_j}}; \quad g_j' = \frac{1}{\sigma_j^2} = \frac{1}{k} * \frac{n_j}{\delta_j^2} \quad (9)$$

Значения поправочного коэффициента  $k$  определяется по известной методике [1] в зависимости от значения нормированной функции Лапласа  $\Phi(z)$ , где  $Z_{\alpha/2} = 1,1 \dots 2.58$  при  $\alpha = 0,9 \dots 0,99$  – уровне доверительной вероятности.

Значения  $g_j$  и  $\check{T}_k$  определяется (7) и (8).

Среднеквадратичное отклонение систематической погрешности оценок будет определена на основе (10), (11):

$$\sigma[\delta] = \sqrt{\frac{\sum_j^L g_j^2 * \delta_j^2}{3}}, \quad (10)$$

при равномерном распределении систематической погрешности.

$$\sigma[\delta] = \sqrt{\frac{\sum_j^L g_j^2 * \delta_j^2}{k}}, \quad (11)$$

при нормальном распределении систематической погрешности

При анализе результатов оценок всегда необходимо проверять, как согласуются исходные данные с результатами этих оценок, что и выполняется в корреляционно-регрессионном анализе и синтезе моделей (оценок показателей) [7] путём добавления критерия в соответствии: с (12):  $\sum_i^n T_k i = \sum_n^n T^{\wedge} k i$ . (12)

5. Уточнение методологических подходов в оценке систематических и случайных погрешностей при использовании корреляционно-регрессионного анализа и синтеза моделей

Уточнение методологического подхода в оценке погрешностей показателей производственных и технологических процессов продиктован длительным периодом (выше 30 лет) исследований и работы автора в судостроительной промышленности и системе высшего образования.

В [6] указано на необходимость уточнения трактовки физического смысла множественного коэффициента корреляции «R», корреляционного отношения « $\rho_1$ » и погрешности « $\delta$ ».

Поскольку в методологическом подходе [7] систематическая методическая погрешность для линейных регрессионных зависимостей определяется в соответствии с выражением

$$R = \sqrt{\frac{SS_{пер}}{SS_{общ}}} = \sqrt{\frac{SS_{пер} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{SS_{общ} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (12)$$

Погрешность использования линейных моделей, одно- и многопараметрических, представляет систематическую методическую (постоянную) погрешность:

$$\delta = 1 - R. \quad (13)$$

Предложенный подход продиктован постановкой и решением задачи авторитетными авторами в [7]. Значение R в (12) представляет не что иное, как относительный «охват» всего разброса исходных данных использованием линейной рассчитанной модели, и, чем этот «охват» ближе к единице ( $R^2=1$ ), тем меньше погрешность оценки  $\delta$ , что не противоречит практическому смыслу. Нетрудно предположить, что неохваченная часть представляет значение:

$$\delta^2 = 1 - R^2; \quad \delta = \sqrt{1 - R^2} \text{ и близко к } 0, \\ \text{Если в соответствии с [7] значение парного коэффициента корреляции лежит в пределах:} \\ 0,4 \dots 0,6 \leq |r_{yx}| \leq 0,8$$

в этом случае появляются как линейная, так и нелинейная составляющие систематической погрешности в разрабатываемой модели, тогда необходимыми становятся оценки относительных «охватов» как линейной, так и нелинейной составляющих, соотношение между которыми неизвестно:

- линейную составляющую систематической погрешности предложено принять на уровне  $\delta_1 = \sqrt{1 - R^2}$ ;  $\delta_1^2 = 1 - R^2$  (14)

- нелинейную составляющую систематической погрешности предлагается выделить из корреляционного отношения  $\rho^2$  в [8]:

$$\rho^2 = \sqrt{1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2}} \quad (15)$$

где:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\hat{y}_i - y_i)^2}{n-1}}; \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (16)$$

В (15)  $\frac{\sigma^2}{\sigma_y^2}$  - нелинейная систематическая погрешность; чем это значение ближе к 0, тем значение  $\rho^2$  ближе к 1, что также не противоречит вычислительным процедурам, поскольку  $\frac{\sigma^2}{\sigma_y^2} = \frac{\sigma^2(e)}{6y^2}$ ;  $\hat{y}_i - y_i = e_i$  - остатки при анализе нелинейной модели. это свойство несмещённости

$$\sum (\hat{y}_i - y_i)^2 = 0$$

проверяется при разработке нелинейных зависимостей [7]. В этом случае значение

$$\rho^2 = \left[ 1 - \frac{\sigma^2}{6y^2} \right] \text{ приближается к } 1. \text{ Тогда}$$

предлагается принять нелинейную составляющую систематической погрешности:

$$\delta_2^2 = \frac{\sigma^2}{6y^2}. \quad (17)$$

При условии, что составляющие систематической погрешности, линейная и нелинейная, являются независимыми

случайными величинами, можно записать для суммарной систематической погрешности нелинейных моделей оценки:

$$\delta \Sigma^2 = (1 - R^2) + \left(\frac{\sigma^2}{6y^2}\right). \quad (18)$$

$$\delta \Sigma = \sqrt{(1 - R^2) + \left(\frac{\sigma^2}{6y^2}\right)}. \quad (19)$$

Выражение (17) целесообразно использовать в случае, если соотношение  $0 \leq |r_{yx}| \leq 0,4$ ,

поскольку разрабатываемые модели отличаются сложностью, но практика расчётов показывает преимущественное наличие нелинейной составляющей систематической погрешности [3,7].

С учётом выше изложенного методического подхода для 4-х рассчитанных достоверных моделей оценки трудоёмкости строительства судового заказа (табл.9 [7]), получена оценка систематической погрешности и объединённого значения показателя трудоёмкости (табл.1)

Таблица 1

**Оценка погрешности и значения объединённого показателя трудоёмкости строительства судового заказа  $Y_\Phi$**

№	Вид расчётной модели (табл.9 [8])	R по (12)	$\delta$ по (14)	$g'_i$ по (9)	$g_j$ по (7)	Оценка $Y_\Phi'$ , нормо-ч
	$Y_\Phi = -2177569 + 99251x_1^*$	0,985	0,17255	52,07	0,3158	6945392
	$Y_\Phi = -8061760 + 56127x_2^*$	0,986	0,37752	10,88	0,0660	4763365
	$Y_\Phi = -7793227 + 57121x_3^*$	0,972	0,18573	44,94	0,2758	4773362
	$Y_\Phi = -25520496 + 860621x_4^*$	0,973	0,16496	56,98	0,3456	4773363

где:  $x_1^* = 70000$  т- дедвейт;  $x_2^* = 228.5$  м – длина судна максимальная;  $x_3^* = 220$  м – расстояние между перпендикулярами;  $x_4^* = 35.2$  м – ширина судна.

Средневзвешенное расчётное по (8):  $Y_\Phi = 4287647$  нормо-ч; среднеквадратичное отклонение систематической погрешности объединённых результатов 4-х оценок по (11):  $\sigma[\delta] = 0,1162$  (11,5 %).

**Выводы**

Предложенный новый методологический подход в получении оценок показателей и параметров производственных и технологических процессов в судостроении позволяет при его использовании:

- повысить эффективность нормирования работ в судостроении, начиная с ранних этапов технической подготовки производства;

- значительно снизить погрешность оценок (до 5...12%) за счёт усреднения результатов, полученных на основе нескольких рассчитанных моделей (от 4 до 10 и более), достоверных и адекватных условиям производства и содержащих определяющие квалификационные характеристики судов и конструктивно-технологические параметры судов и судового оборудования;

- обеспечить корректную корректировку существующих и устаревших на сегодня нормативов

трудоемкости в судостроении и других отраслях промышленности;

- получать искомые значения достоверных показателей производственных и технологических процессов с низкими значениями систематической и случайной погрешностей, начиная с ранних этапов

проектирования и технологической подготовки производства;

- объединять параметрический и временной подходы [3,7] для достоверного прогноза загрузки предприятия в соответствии с изменяющимися целевыми программами строительства судов в РФ.

#### Литература

1. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. Энергия. Ленинградское отделение.1978, 204с.
2. Богданов А.Е. Организационно-управленческие технологии создания и технического обслуживания морской техники. Диссертация на соискание учёной степени д.т.н. СПб, 2017 г.
3. Герман Г.В.Методология управления технологией монтажа судового электрооборудования. Диссертация на соискание учёной степени д.т.н. СПб, 2003 г. 338л.
4. Ураков Д.У. Учёт затрат по сферам деятельности. М.: Финансы и статистика, 1991 г. 176 с.
5. Г.В.Герман, В.А.Рогозин, Г.А.Емельченков. Обеспечение конкурентоспособности строительства судовых заказов в условиях конкретного судостроительного производства. Материалы доклада на Научно-технической конференции «75 лет на рубеже передовых технологий» ЦТСС , СПб, окт. 2014 г. 6с.
6. Герман Г.В., Герасимов Н.И. Концептуальная постановка задачи укрупнённого достоверного нормирования работ в судостроении. Морские интеллектуальные технологии Т1 1 (43) 2019 г. с....
7. Герман Г.В., Богданов А.Е. Об управлении жизненным циклом судовых заказов Материалы доклада на Научно-технической конференции «75 лет на рубеже передовых технологий» ЦТСС , СПб, окт. 2014 г.7с.
8. Герман Г.В., Черненко В.И. Резник Б.Л., Черкас Д.Д. Расчётно-аналитические методы и их использование при решении задач технологической подготовки машиностроительного и судостроительного производств. Учебное пособие. РИО СПбГМТУ, СПб. 2015 г., 63с.
9. Н.Дрейпер, Г.Смит. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1987 г. Книга 1- 368 с., Книга 2 -352 с.

#### References

1. Rabinovich S.G.(1978). Pogreshnosti izmerenij. ENnergiya. Leningradskoe otdelenie. 204p.
2. BogdanovA.E.(2017) Organizacionno-upravlencheskie tekhnologii sozdaniya i tekhnicheskogo obsluzhivaniya morskoy tekhniki. Dissertaciya na soiskanie uchyonoy stepeni d.t.n. SPb,283p.
3. GermanG.V.(2003) Metodologiya upravleniya tekhnologiej montazha sudovogo ehlektrooborudovaniya. Dissertaciya na soiskanie uchyonoy stepeni d.t.n. SPb 338p.
4. Urakov D.U.(1991) Uchyot zatrat po sferam deyatel'nosti. M.:Finansy i statistika, 173p.
5. GermanG.V.,RogozinV.A.,Emel'chenkovG.A.(2016).Obespechenie konkurentosposobnosti stroitel'stva sudovyh zakazov v usloviyah konkretnogo sudostroitel'nogo proizvodstva. Materialy doklada na Nauchno-tekhnicheskoy konferencii «75 let na rubezhe peredovyh tekhnologij» CTSS SP pp.50-55.
6. GermanG.V.,GerasimovN.I (2019) Konceptual'naya postanovka zadachi ukрупnyonnogo dostovernogo normirovaniya rabot v sudostroenii. Morskie intellektual'nye tekhnologii T1,1(43) p.
7. German G.V., Bogdanov A.E. (2014).Ob upravlenii zhiznennym ciklom sudovyh zakazov Materialy doklada na Nauchno-tekhnicheskoy konferencii «75 let na rubezhe peredovyh tekhnologij» CTSS , SPb, pp.432-438
8. German G.V.,CHernenko V.I.,Reznik B.L.,CHerkas D.D.(2015) Raschyotno-analiticheskie metody i ih ispol'zovanie pri reshenii zadach tekhnologicheskoy podgotovki mashinostroitel'nogo i sudostroitel'nogo proizvodstv. Uchebnoe posobie. RIO SPbGMTU, SPb. 63p.
9. DrejperN.,SmitG.(1987). Prikladnoj regressionnyj analiz. M:Finansy i statistika, Kniga 1 368 p., Kniga 2 352p.



УДК: 629.128.1

## ОБОСНОВАНИЕ УКРУПНЁННОГО ДОСТОВЕРНОГО НОРМИРОВАНИЯ РАБОТ В СУДОСТРОЕНИИ

**Галина Валентиновна Герман**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии судового машиностроения  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
тел. (812) 713-84-05 e-mail: germangalina@yandex.ru

**Николай Иванович Герасимов**

доктор технических наук, Заслуженный машиностроитель Российской Федерации, Главный научный  
сотрудник НТФ «Судотехнология»  
Россия, 198095, Санкт-Петербург, Промышленная ул. д.7.  
Тел.: (812)-610-45-68 e-mail: 1331@ssts.spb.ru

### Аннотация

Основными показателями конкурентоспособности отечественных судовых заказов предлагается считать производительность труда, технический и организационный уровень судостроительного производства, технологичность конструкции судов и судового оборудования. Вновь строящееся судно и процесс его создания относятся к большим техническим системам (БТС), в которых технико-экономические, технические, конструкторские, технологические, организационные и иные являются взаимосвязанными. Вот почему обеспечение конкурентоспособности предлагается выразить новыми целевыми функциями строительства.

Такой подход на системной основе должен содержать достоверные оценки (прогноза) всех видов издержек судостроительного производства, начиная с ранних этапов проектирования. Предложенный подход является тем методическим руководством, которое обеспечивает достижение сформулированных целей различного уровня, оценки выполнимости работ по договору, трудоёмкости технического и организационного уровня судостроительного производства. Разработанные математические зависимости позволяют получить названные оценки, начиная с ранних этапов проектирования.

**Ключевые слова:** целевые функции строительства конкурентоспособных судов в РФ; укрупнённые оценки показателей судостроительного производства; учёт конкретных условий работ; достоверность и адекватность оценок.

## RATIONALE FOR THE FAIR USAGE RATIONING WORKS IN SHIPBUILDING

**Galina V. German**

Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Shipbuilding Engineering Department of  
St. Petersburg State Maritime Technical University 190121, St. Petersburg, st. Lotsmanskaya, 3  
tel: +7 (812) 713-84-05, e-mail: germangalina@yandex.ru

**Nikolay I. Gerasimov**

The professor, Dr.Sci.Tech, Honored mechanical engineer of Russian Federation, Chief researcher of the NTF  
"Sudotehnologija"  
Industrial str., 7, 198095, Saint-Petersburg Russian Federation  
Tel.: (812)-610-45-68 e-mail:1331@ssts.spb.ru

### Abstract

Main indicators of competitiveness of domestic ship orders be considered productivity, technical and organizational level of shipbuilding, manufacturability, ship construction and ship equipment. The newly constructed vessel and the process of its creation are to large technical systems (bps) in which techno-economic, technical, engineering, organizational and other are mutually interdependent. That is why competitiveness is invited to express its new target construction features. Such an approach in a systematic manner should contain reliable estimates (prediction) of all types of costs of shipbuilding, from the early design stages. The proposed approach is the guidance, which provides the achievement of the objectives at various levels, assess the feasibility of the work under the contract, considering technical and organizational level of shipbuilding from the early design stages. The proposed approach is the guidance, which provides the achievement of the objectives at various levels, assess the feasibility of the work under the contract, considering technical and organizational level of shipbuilding. Developed mathematical dependences allow to obtain named evaluation, starting with the early design stages.

**Key words:** the target function of the construction of the competitive courts in the Russian Federation; larger assessment of shipbuilding; account of the specific conditions of work; accuracy and adequacy of the evaluations

**Введение**

Как предложено исследованиями [1,2,3], основными показателями обеспечения конкурентоспособности строительства судовых заказов в РФ являются производительность труда, технический и организационный уровень судостроительного и машиностроительного производств, технологичность конструкции судов и судового оборудования. Названные показатели существенным образом отличаются от принятых в оценках судостроительного производства зарубежных верфей.

Для оценки уровня производственных процессов в судостроительной отрасли зарубежных верфей используется отношение построенного за год тоннажа (в СГТ) к количеству работников верфи, занятых на строительстве. Так, в Японии этот показатель составляет около 180 СГТ/чел., в Южной Корее - 145, в Германии - 75, в остальных странах ЕС - 40, в России - 20. Вот почему принятие зарубежного опыта и прямое проецирование его на отечественную отрасль в части выбора целевых функций строительства конкурентоспособных судов может привести к принципиально неправильным решениям, негативным для отрасли в целом. Это справедливо почти для всего судостроения, когда отечественные предприятия работают совсем в других условиях, включая низкую серийность строительства, более низкий уровень технического оснащения производства, иную организацию строительства судовых заказов и т.д.

При планировании работ в отечественном судостроении приняты показатели трудоёмкости строительства (проектная, нормативная, фактические и т.д.). Разработка рабочей технологии строительства выполняется на основе оценки готовности и продвижения работ, которые отражают потребные объёмы выполнения работ, планируемые на конец временного периода (этапа) [1,2], а также определяют объёмы работ на каждом временном шаге производства. Следует отметить, что значение потребной готовности планируемых к выполнению работ при строительстве конкурентоспособных судовых заказов (Гот<sup>потр.</sup>) [1] определяется для вновь строящегося судна классом, типом и назначением, насыщением судна оборудованием, необходимым для выполнения всех возложенных на него функций и задач, условиями плавания, серийностью строительства, а также условиями строительства судна на конкретном судостроительном предприятии (судоверфи). Оценка достигнутого значения продвижения работ, в том числе приходящаяся на одного средневзвешенного работающего, полученная по данным предыдущего ретроспективного периода, может отражать достигнутые показатели производительности труда, технического и организационного уровней производства и позволяет оценить планируемое значение возможной готовности работ (Гот<sup>возм.</sup>) при строительстве нового заказа.

Условиями обоснованного выхода предприятия на тендер является получение достоверной оценки прогнозного значения трудоёмкости строительства заказа (Т<sub>стр.</sub>), стоимости строительства (С<sub>стр.</sub>) и сроков строительства (t<sub>стр.</sub>) в конкретных условиях

производства, включая оценку выполнимости работ [1].

Современный период возрождения российского судостроения требует новых подходов к оценке и обеспечению конкурентоспособности судовых заказов применительно к условиям конкретного судостроительного производства.

Оценке конкурентоспособности уделено внимание в работах [3,4], где предложены такие показатели, как качество судов (например, отсутствие вибраций в процессе плавания), сокращение сроков строительства, сокращение издержек на строительство и эксплуатацию судов и др.

По мнению авторов статьи для получения эффекта при обеспечении конкурентоспособности в отечественном судостроении требуется обязательный учёт условий производства работ на конкретном судостроительном предприятии, включая достигнутые уровни производительности, технического оснащения, организации производства и технологичности конструкции судна и судового оборудования, обеспечиваемой при проектировании. На этапе укрупнённого планирования работ необходимо иметь достоверную оценку трудоёмкости строительства по всем типовым технологическим периодам в соответствии с принятой технологией строительства и всем видам судостроительных производств.

**1. Новые подходы в оценке показателей отечественного судостроения**

Вновь строящееся судно и процесс его создания относятся к большим техническим системам (БТС) [2], в которых технико-экономические, технические, конструкторские технологические, организационные и иные характеристики производственных процессов и судов являются взаимосвязанными. Вот почему обеспечение конкурентоспособности строительства судов в конкретных производственных условиях с учётом ограничений рынка предлагается выразить целевой функцией строительства судов в следующем виде [1, 2] (1):

выполнение заданного объёма работ за согласованную стоимость строительства заказа при непревышении сроков строительства, определяемых на этапе предконтрактного проекта.

Обеспечение качества судов, удовлетворяющих требованиям Заказчика, и технико-экономических показателей производства при этом предлагается учитывать как ограничения.

$$L_1 = T_{стр.} \leq T_{стр.}^* \quad \left\{ \begin{array}{l} C_{стр.} \leq C_{стр.}^*; \\ T_{стр.} \leq T_{стр.}^*; \\ \{K_{ij}\} \geq \{K_{ij}^*\}; \\ \{TЭП_{ij}\} \geq \{TЭП_{ij}^*\}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где L<sub>1</sub> – сформулированная целевая функция; T<sub>стр.</sub>, T<sub>стр.</sub><sup>\*</sup> - фактический срок строительства и планируемый по договору; {K1} – множество мероприятий в обеспечение строительства судна; C<sub>стр.</sub>, T<sub>стр.</sub>, {K<sub>ij</sub>}, {TЭП<sub>ij</sub>} – фактические значения себестоимости, трудоёмкости, множеств показателей качества и технико-экономических показателей производства, достигнутые в процессе строительства судна; C<sub>стр.</sub><sup>\*</sup>, T<sub>стр.</sub><sup>\*</sup>, {K<sub>ij</sub>}, {TЭП<sub>ij</sub>} –

аналогичные показатели, определяемые договорными обязательствами, техническими требованиями и планируемыми к выполнению судостроительным предприятием. Непревышение сроков, стоимости и трудоёмкости строительства, определяемых договорными обязательствами, обеспечивают получение прибыли судостроительным предприятием. Одновременно с учётом названных показателей должна быть

определена выполнимость работ по договору для конкретных производственных условий судостроительного предприятия (верфи). В указанной связи возникает необходимость установления связей на укрупнённом уровне в соответствии с целевой функцией (1) в границах планируемой технологии строительства. На рис. 1 представлена схема, поясняющая оценку выполнимости работ

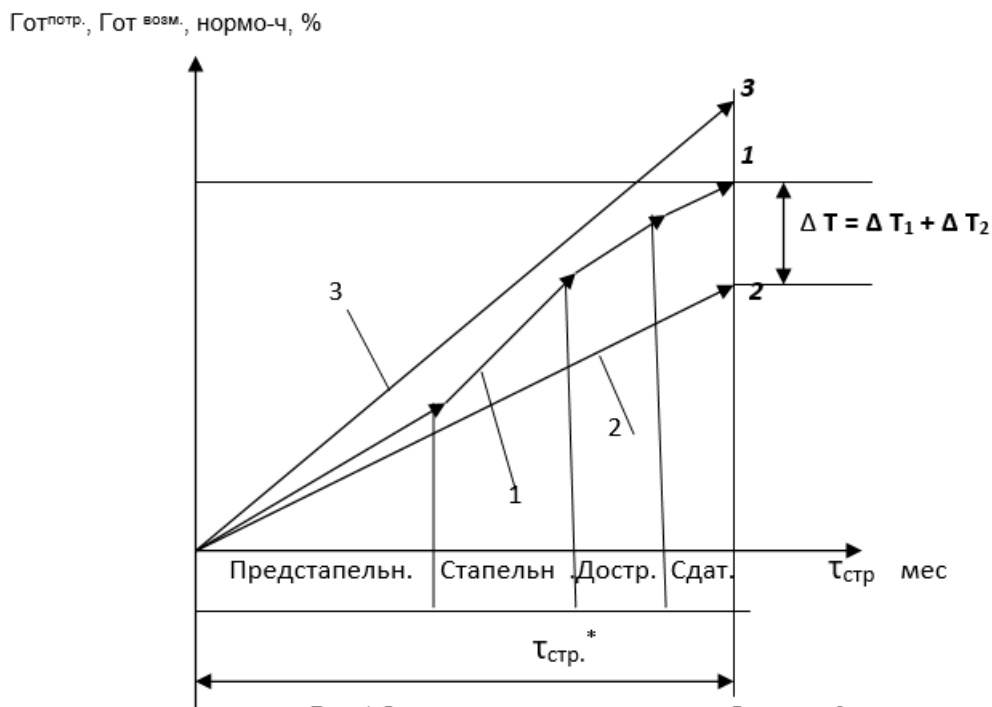


Рис. 1 Схема оценки выполнимости работ на судне

Схема отражает график потребной готовности работ  $G_{от}^{потр}$  (ломаная 1) на заказе, определяемый проектной технологией строительства судна, и прямые готовности возможной  $G_{от}^{возм}$  (прямые 2,3), определяемые средними значениями возможного продвижения работ, соответствующих различным условиям производства. Точка «1» на схеме определяет  $G_{от}^{потр} = 100\%$  (или равную  $T_{стр}^*$ , см. [1]). Прямая 2 (точка 2) - низкая возможность судостроительного производства в выполнении договорных обязательств, прямая 3 (точка 3) - нехватка работ в портфеле заказов. Прямые 2 и 3 построены с учётом прогноза загрузки предприятия по всему портфелю заказов. Ломаная линия 1, показанная схематично, отражает потребную загрузку по типовым технологическим периодам (предстапельному, стапельному, достроечному, сдаточному). Готовность потребная работ  $G_{от}^{потр} = 100\%$  при  $T_{стр}^*$  должна достоверно оцениваться (в норма-ч) на стадии предконтрактного проекта для условий конкретного предприятия (судоверфи). В случае недогрузки работами (прямая 3, точка «3») судостроительному предприятию следует принимать меры для пополнения портфеля заказов.

Готовность возможная:  
 $G_{от}^{возм} = \rho^* T_{стр}^{**}$ , (2)

где  $\rho$  – среднее продвижение работ, рассчитанное по данным построенных за предыдущий период заказов;

$T_{стр}^*$  - срок строительства заказа, планируемый по договору.

Разность трудоёмкостей по окончании работ в точках «1» и «2»:

$$(T_{потр.1} - T_{возм.2}) = \Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 \quad (3)$$

определяет перегруз судостроительного предприятия в будущем, который может быть сокращён за счёт решения задач обеспечения технологичности на ранних (эскизном и/или техническом) этапах проектирования ( $\Delta T_1$ ), в том числе за счёт обеспечения агрегатирования судового оборудования [8], или за счёт повышения технического уровня производства ( $\Delta T_2$ ) (применения более производительного технологического оборудования, включая станки с ЧПУ, более совершенных технологических процессов, специализированных средств технологического оснащения, более стойкого режущего инструмента и т.д.). Реализация каждого из возможных решений предполагает определённую сумму затрат на техническое перевооружение производства и получения эффекта, зависящего от доли ( $\alpha_i$ ) работ, для которых предложено и реализовано техническое перевооружение:

$$\Delta T_2 = \sum_i \{ [\alpha_i \cdot (n_i - 1)] / n_i \}, \quad (4)$$

где  $n_i$  - кратность повышения производительности труда при техническом переоснащении производства, раз;  $i$  – порядковый номер внедряемого мероприятия по техническому переоснащению производства.

Если на этапе конструкторской подготовки производства не обеспечено значение  $\Delta T_1$ , то сокращение перегруза работами может быть достигнуто только за счёт повышения технического уровня производства при одновременном повышении затрат на закупку (изготовление) нового оборудования, инструмента, приспособлений, контрольно-измерительных приборов, внедрения инновационных технологических процессов.

Тогда необходимое повышение технического уровня производства ( $\Delta K_{\text{ТУ}}$ ) в обеспечение строительства конкурентоспособных заказов может быть определено следующим образом:

$$\Delta K_{\text{ТУ}} = (\Delta T_2) / (T_{\text{стр.}}^*); \quad (5)$$

$$\text{Гот}_{\text{потр.}} = 100\% \text{ при } (T_{\text{стр.}}^*).$$

Необходимое значение технического уровня производства ( $K_{\text{ТУ}}^*$ ):

$$K_{\text{ТУ}}^* = (T_{\text{стр.}}^*) / (T_{\text{стр.}}) - \quad (6)$$

определяется средним значением потребного продвижения работ на новом заказе.

Разность трудоёмкостей  $[(T^{\text{потр.}_i}) - (T^{\text{возм.}_3})]$  определяет недогруз работами, с целью сокращения которого предлагается пополнение портфеля заказов.

Сумма модулей разности  $\sum_{i=1}^n [| \text{Гот}_i^{\text{потр.}} - \text{Гот}_i^{\text{возм.}} |]$  определяет необходимость совершенствования организации производства на всех временных шагах планирования работ  $i = 1, n$ :

$$K_{\text{оу}}^* = \{ \sum_i [| \text{Гот}_i^{\text{потр.}} - \text{Гот}_i^{\text{возм.}} |] \} / (T_{\text{стр.}}^*) * (T_{\text{стр.}}) \quad (7),$$

где  $K_{\text{оу}}^*$  – определяет значение коэффициента организационного уровня работ, снижение которого обеспечит достижение целевой функции (1).

Совершенствование организации производства в обеспечение строительства конкурентоспособных заказов может быть достигнуто при выравнивании загрузки за счёт оптимизации планирования с использованием резервов загрузки, резервов времени работ, привлечения дополнительной численности работающих и т.д. Названная задача решается в процессе оптимизации планирования работ на системной основе для различных уровней планирования (укрупнённого, детального). При этом целевые функции оптимального планирования должны быть увязаны с целевой функцией строительства конкурентоспособных судов (1) [2].

Оптимизация планирования – системная задача, которая должна решаться судостроительным предприятием при выравнивании загрузки методами нелинейного планирования комплекса судостроительных работ с учётом временных ограничений технологии строительства (цеховых обеспечивающих работ предстательного периода, стальных работ всех видов, - корпусосборочных, гидравлических изоляционных, механомонтажных, трубомонтажных, отделочных, электромонтажных, а также достроечных и сдаточных). Укрупнённые организационно-технологические схемы работ должны рассматриваться в границах технологических периодов и этапов выполнения

работ, планово - учётных единиц, укрупнённых объектов работ.

Целевая функция планирования оптимальной загрузки на укрупнённом уровне, взаимоувязанная с целевой функцией строительства конкурентоспособных судов (1), может быть представлена в виде:

$$L_2 = \min \{ S_i = \sum_i [ (\text{Гот}_i^{\text{потр.}}) - (\text{Гот}_i^{\text{возм.}}) ], \quad (8)$$

$\{K2\}$   
где  $S_i$  – интегральная разностная функция готовностей работ;  $i = 1, n$  - порядковый номер временного шага планирования;  $\text{Гот}_i^{\text{потр.}}, \text{Гот}_i^{\text{возм.}}$  – значения готовностей потребной и возможной на  $i$ - том временном шаге планирования;  $\{K2\}$ - множество вариантов решений, обеспечивающих выравнивание загрузки комплексом работ.

По результатам оптимизации планирования работ на укрупнённом уровне на детерминированной основе в соответствии с (8) определяются граничные сроки выполнения укрупнённых видов работ в укрупнённых объектах работ, а также сроки этапной программы поставок комплектующего оборудования, материалов, полуфабрикатов для обеспечения выполнения работ.

Решение задач оптимального планирования на укрупнённом уровне может быть получено также с использованием вероятностного подхода, учитывающего влияние случайных внешних и внутренних факторов производства, изменяющих все виды затрат и временные характеристики организационно-технологических схем работ [2].

Значения трудоёмкости для решения задач укрупнённого планирования предлагается получать с учётом условий выполнимости работ [1,2] на основе достоверных моделей, адекватных конкретным условиям производства.

Оптимизацию планирования детальных видов стапельных работ, например, корпусосборочных, механомонтажных, электромонтажных и др., предлагается выполнять с использованием целевой функции  $L_3$  для выборки соответствующих работ [ 2 ]:

$$L_3 = \min \{ S_j = \sum_i [ (p_i^{\text{св.}}) - (p_i^{\text{потр.}}) ], \quad (9)$$

$\{K3\}$   
где  $S_j$  – дифференциальная разностная функция;  $\{K3\}$  – множество мероприятий по обеспечению выравнивания загрузки детальными работами;  $p_i^{\text{св.}}$  – продвижение работ, определяемое наличием свободной численности рабочих;  $p_i^{\text{потр.}}$  – потребное продвижение работ, определяемое результатами оптимального планирования загрузки в соответствии с (9);  $i = 1, n$  – порядковый номер временного шага планирования.

Возможно решение названных задач итерационными методами нелинейного планирования (программирования) с использованием целевых функций (8), (9), увязанных с целевой функцией строительства конкурентоспособных судов (1). результаты решения указанных задач представлены в [ 2 ].

Решение задач детального планирования оптимальной загрузки цеховыми работами сегодня выполняется с использованием ПО CAD/CAM. Возможно решать названные задачи методами динамического планирования (программирования) с использованием целевых функций (8), (9).

Множество показателей качества  $\{K_{ij}\}$  закладывается при проектировании, обеспечивается в процессе строительства. Обеспечение показателей качества, как обязательное требование, определяется использованием инновационных технологий, техническим оснащением производства, организацией производства и труда, численностью и квалификацией работающих, равномерной загрузкой всех видов работ, определяемой в процессе планирования, оптимизацией планов в соответствии с (1), (8), (9), своевременным и полным информационно-логистическим обеспечением производства, опытом строительства судовых заказов и т.д. В современных условиях названное множество мероприятий частично планируется и выполняется судостроительным предприятием на системной основе на различных уровнях планирования, но требует всестороннего учёта связей принимаемых решений и наличия достоверной системы оценок значений трудоёмкости всех видов работ с учётом влияющих внутренних и внешних факторов, производства, начиная с ранних этапов конструкторско-технологической подготовки производства.

Финансирование и обеспечение поставок комплектующего оборудования, материалов, полуфабрикатов, решение задач конструкторско-технологической подготовки производства неизбежно увязано с типовыми технологическими периодами строительства заказов, включая технологические этапы формирования укрупнённых объектов стапельных работ (строительных районов, блоков, блок - модулей и целого корпуса судна), Сроки начала, окончания и продолжительности технологических периодов и этапов определяются, в конечном итоге, укрупнённой технологической схемой строительства высшего уровня. При этом решение задач планирования и выравнивания загрузки всех видов работ должно базироваться на укрупнённых значениях трудоёмкости, полученных на достоверной основе. Однако до сих пор не предложено увязывать названный подход с оценками решений на укрупнённом уровне, с выполнимостью работ в границах основных договорных обязательств. Не используются (или отсутствуют) также методы достоверного укрупнённого нормирования работ, соответствующие условиям конкретного судостроительного производства.

Показатели производственной технологичности, закладываемые при проектировании судов, не в полной мере увязаны с изменением всех видов затрат (денежных, трудовых, материальных, энергетических) при строительстве судна. Учёт этой связи становится актуальным особенно на ранних этапах проектирования применительно к конкретным условиям производства. Необходимость решения задач обеспечения технологичности также не увязана с требованиями и возможностями повышения технического и организационного уровня судозавода на системной основе.

Реализация выше указанных требований в обеспечение строительства конкурентоспособных судов требует оценки всех видов затрат на системной основе с учётом временных ограничений задач укрупнённого планирования (8) для задач

детального планирования (9) (расцеховки работ, цеховых участков, бригад) и учёта результатов оптимизации решения задач низшего уровня в задачах укрупнённого уровня [ 2,5 ].

В процессе обеспечения конкурентоспособности затратные показатели должны быть достоверно прогнозируемы, начиная с ранних этапов проектирования, и адекватны будущим условиям выполнения работ. Указанная проблема может быть решена за счёт создания укрупнённых нормативов трудоёмкости, материалоёмкости, энергоёмкости, содержащих квалификационные характеристики судов и значения определяющих конструктивно-технологических параметров судового оборудования, включая их изменения во времени [2,7].

## 2. Обеспечение достоверности оценок судостроительного предприятия при участии в тендере

На этапе предконтрактного проекта судостроительному предприятию, участвующему в тендере, необходимо достоверно спрогнозировать значение трудоёмкости строительства будущего судового заказа адекватно условиям производства ( $T_{стр}$ ), а также оценить выполнимость работ по договору.

На основе достоверного прогнозного значения трудоёмкости может быть получена оценка издержек производства (заводской себестоимости) и стоимость строительства заказа с учётом условий рынка. В настоящее время в отечественном судостроении предложен подход к оценке стоимости строительства судового заказа с учётом особенностей судостроения [4]:

- калькуляционный метод оценок издержек судостроительного производства;
- метод сопоставления цены и параметров анализируемого судна с ценой и параметрами судна-аналога;
- метод анализа конечных экономических результатов использования судна потребителем.

При этом расчёт затрат на постройку нового судна предложено выполнять [ 4 ]:

- калькуляционным методом (без доказательств статистической устойчивости оценок по статьям затрат);
- по конструктивным разделам нагрузки масс, значение которой станет известно на последнем этапе проектирования.

Существуют методы оценки издержек производства от себестоимости изготовления корпуса судна и другие.

Все предлагаемые методы оценок противоречат требованиям информационных технологий, так как информация по ним появляется на более поздних этапах конструкторско-технологической подготовки производства, а также отсутствуют подтверждающие расчёты о наличии и степени тесноты связей между показателями трудоёмкости, стоимости и их составляющими с параметрами, использованными в предложенных моделях оценки.

Указанные обстоятельства приводят к появлению значительных систематических (методических) погрешностей и случайных погрешностей, обусловленных погрешностями исходных данных,

что не обеспечивает достоверности оценок на стадии участия судостроительного предприятия в тендере.

Исследованиями в [2] установлено, что возникает тесная статистическая связь между трудоёмкостью строительства ( $T_{стр.}$ ) и значениями затрат на строительство судна ( $C_{стр.}$ ), дисконтированными по времени в соответствии с правилом Пааше [2, 6]. Поскольку характеристика ( $T_{стр.}$ ) - показатель эволюционного развития производства, то достоверные оценки трудоёмкости работ по укрупнённым технологическим периодам, этапам, укрупнённым и детальным объектам стапельных, достроечных и сдаточных работ позволяют воплотить систему достоверного прогноза с использованием математических моделей оценки названных видов (подвидов) работ, если они удовлетворяют всем статистическим критериям несмещённости, эффективности и состоятельности. Такие методы разработки изложены в [5,6] и многократно проверены для ряда предприятий судостроительной и других отраслей промышленности.

Особенностью разработки достоверных статистически значимых моделей оценки является выявление и использование определяющих квалификационных характеристик и конструктивно-технологических параметров судов и судового оборудования, технических и эксплуатационных характеристик продукции предприятий, известных на ранних этапах конструкторско-технологической подготовки производства.

Определяющие характеристики и параметры наиболее прямым и тесным образом, линейно или нелинейно, связаны с искомыми показателями, что позволяет разрабатывать как параметрические, так и временные модели оценки всех видов затрат, трудоёмкости, стоимости, материалоёмкости, энергоёмкости для различных видов работ и вариантов конструктивных решений оборудования, машин и механизмов. Разработанные модели удовлетворяют всем статистическим критериям и обеспечивают адекватность условиям конкретного производства, позволяют выполнить достоверный параметрический и временной прогноз требуемых

показателей со значительно меньшей погрешностью, нежели в используемых сегодня методических подходах. Одновременный учёт параметрического и временного подходов, усреднение результатов оценок, полученных на перекрывающихся множестве параметров, позволяет снизить погрешность оценок искомых показателей до 5...12%. [2,5,9].

### Выводы

Обеспечение конкурентоспособности строительства судовых заказов в условиях конкретного судостроительного предприятия выдвигает следующие требования:

Необходимость постановки и решения предложенных задач на системной основе.

Формулирование и декомпозиция целевых функции сверху донизу.

Прогноз достоверного значения трудоёмкости строительства судового заказа для условий конкретного судостроительного производства. Оценка выполнимости работ по строительству судового заказа на этапе предконтрактного проекта

Разработка системы укрупнённых нормативов (моделей оценки) трудоёмкости по типовым технологическим периодам, этапам, видам и подвидам судостроительных работ различного уровня с учётом опыта строительства предыдущих заказов конкретным судостроительным предприятием.

Разработка и реализация мероприятий в обеспечение сокращения или устранения рассогласований потребностей строительства в соответствии с договорными обязательствами и возможностью судостроительного предприятия по целевым функциям (8), (9).

Оптимизация системы информационно-логистического обеспечения на основе решений задач оптимального планирования работ как укрупнённых, так и детальных, предлагается выполнять на детерминированной и стохастической основе.

### Литература

1. Г.В.Герман, В.А.Рогозин, Г.А.Емельченков. Обеспечение конкурентоспособности строительства судовых заказов в условиях конкретного судостроительного производства. Материалы доклада на Научно-технической конференции «75 лет на рубеже передовых технологий» ЦТСС, СПб, окт. 2014 г. 6 с.
2. Герман Г.В. Методология управления технологией монтажа судового электрооборудования. Диссертация на соискание учёной степени д.т.н. СПб, 2003 г. 338с.
3. Александров В.Л., Соколов В.Ф., Перельгин А.В. Судостроительное предприятие в условиях рынка. Проблемы адаптации и развития. СПб: Судостроение, 2003 г. 424 с..
4. Грицан А.Б. Методы инженерно-экономического анализа в ценообразовании на суда и плавсредства. Часть 1. Производительность, конкурентоспособность и тенденции в отечественном и мировом судостроении. 2004 г. 492 с.
5. Герман Г.В., Черненко В.И. Резник Б.Л., Черкас Д.Д. Расчётно-аналитические методы и их использование при решении задач технологической подготовки машиностроительного и судостроительного производств. Учебное пособие. РИО СПбГМТУ, СПб. 2015 г., 63с.
6. Тимофеева А.А. Матричная модель прогнозирования издержек производства на электромонтажные работы в судостроении. Диссертация на соискание уч. ст. к.э.н. СПб, 1998 г. 120 с.
7. Герман Г.В., Рогозин В.А., Емельченков Г.А. Прогноз трудоёмкости строительства конкурентоспособных судов с учётом условий производства. СПб. «Морской вестник», №11, 2014 .3 с.
8. Н.И.Герасимов, А.О.Михайлов, И.В.Грачёв. Расчёт технико-экономических показателей внедрения модульно-агрегатного метода монтажа судового оборудования при постройке объектов морской техники. Санкт-Петербург, АО ЦТСС, 2017 г., 92 с.



9. Герман Г.В. Новые методологические подходы в получении оценок показателей и параметров производственных и технологических процессов в судостроении. Морские интеллектуальные технологии . Т1 1(43) 2019 г. с.

#### References

1. German G.V., Rogozin V.A., Emel'chenkov G.A. (2016). Obespechenie konkurentosposobnosti stroitel'stva sudovyh zakazov v usloviyah konkretnogo sudostroitel'nogo proizvodstva. Materialy doklada na Nauchno-tekhnicheskoy konferencii «75 let na rubezhe peredovyh tekhnologij» CTSS SP pp.50-55.
2. German G.V. (2003). Metodologiya upravleniya tekhnologiej montazha sudovogo ehlektrooborudovaniya. Dissertaciya na soiskanie uchyonoy stepeni d.t.n. SPb, 338p.
3. Aleksandrov V.L., Sokolov V.F., Perelygin A.V. (2003) Sudostroitel'noe predpriyatie v usloviyah rynka. Problemy adaptacii i razvitiya. SPb: Sudostroenie, 424p.
4. Grican A.B. (2004). Metody inzhenerno-ehkonomicheskogo analiza v cenoobrazovanii na suda i plavsredstva. CHast' 1. Proizvoditel'nost', konkurentosposobnost' i tendencii v otechestvennom i mirovom sudostroenii. 492 p.
5. German G.V., CHernenko V.I., Reznik B.L., CHerkas D.D. (2015) Raschyotno-analiticheskie metody i ih ispol'zovanie pri reshenii zadach tekhnologicheskoy podgotovki mashinostroitel'nogo i sudostroitel'nogo proizvodstv. Uchebnoe posobie. RIO SPbGMTU, SPb. 63p.
6. Timofeeva A.A. (1998) Matrichnaya model' prognozirovaniya izderzhek proizvodstva na ehlektromontazhnye raboty v sudostroenii. Dissertaciya na soiskanie uch. st. k.eh.n. SPb. 120p.
7. German G.V., Rogozin V.A., Emel'chenkov G.A. (2014). Prognoz trudoyomkosti stroitel'stva konkurentosposobnyh sudov s uchytom uslovij proizvodstva. SPb. «Morskoj vestnik», №11, pp.18-21.
8. Gerasimov, A.O. Mihajlov, I.V. Grachyov. (2017). Raschyot tekhniko-ehkonomicheskikh pokazatelej vnedreniya modul'no-agregatnogo metoda montazha sudovogo oborudovaniya pri postrojke ob"ektov morskoy tekhniki. Sankt-Peterburg, AO CTSS, 92p.
9. German G.V. (2019) Novye metodologicheskie podhody v poluchenii ocenok pokazatelej i parametrov proizvodstvennyh i tekhnologicheskikh processov v sudostroenii. Morskie intellektual'nye tekhnologii. T1, 1(43) p.

УДК 658.5+338.5

## ВЫЯВЛЕНИЕ, АНАЛИЗ И ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМНЫХ ВОПРОСОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТРУДОЕМКОСТИ И ФОРМИРОВАНИИ ЦЕНЫ НА ПРОДУКЦИЮ И УСЛУГИ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**Анна Валентиновна Фирсова**

доцент кафедры управления судостроительным производством  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3.  
e-mail: firsova-a-v@mail.ru

**Дмитрий Сергеевич Хмара**

доцент, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики судостроительной промышленности  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,  
190008, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3.  
e-mail: dskh@corp.smtu.ru

### Аннотация

Проведен анализ цен на гражданские суда и услуги судоремонта на основе данных ресурса единой информационной системы в сфере закупок и анализ процесса формирования цен в проектных, судостроительных и судоремонтных организациях. Рассмотрено текущее положение дел в области разработки нормативов труда.

Выявлены причины изменения условий, предусмотренной контрактной документацией. Зафиксировано отставание темпов разработки нормативов труда от потребностей судостроительной промышленности, в том числе связанных с цифровизацией и внедрением в производство новых материалов.

Сформулированы проблемные вопросы, содержащиеся в текущих нормативно-методических документах, относительно формирования стоимости строительства судов и услуг судоремонта.

На основании анализа выявленных проблем, сформулированы предложения по развитию эффективной системы нормирования и определения затрат, а также созданию отраслевой информационной базы цен и технических характеристик на гражданские суда, как отечественной, так и зарубежной постройки.

**Ключевые слова:** трудоемкость, цена, государственный контракт, нормативно-методическая документация, гибкие автоматизированные производства, судостроение, судоремонт, цифровые технологии.

## IDENTIFICATION, ANALYSIS AND SOLUTIONS OF PROBLEMATIC ISSUES IN THE DETERMINATION OF LABOR INPUT AND THE PRICING OF PRODUCTS AND SERVICES TO SHIPYARDS

**Anna V. Firsova**

the associate professor of the department of management of the shipbuilding industry  
State Marine Technical University of Saint Petersburg  
Lotsmanskaya Str. 3, St. Petersburg, Russian Federation, 190008  
e-mail: firsova-a-v@mail.ru

**Dmitriy S. Khmara**

the associate professor, Cand. Sci.Econ., associate professor of the department of economics of the shipbuilding industry  
State Marine Technical University of Saint Petersburg  
Lotsmanskaya Str. 3, St. Petersburg, Russian Federation, 190008  
e-mail: dskh@corp.smtu.ru

### Abstract

The analysis of prices for civil ships and ship repair services on the basis of the resource data of the unified information system in the field of procurement and analysis of the pricing process in the design, shipbuilding and ship repair organizations. The current state of Affairs in the field of development of labor standards is considered.

The causes of changes in the conditions envisaged by the contract documents are revealed. There was a lag in the pace of development of labor standards from the needs of the shipbuilding industry, including those related to digitalization and introduction of new materials into production.

The problematic issues contained in the current regulatory and methodological documents regarding the formation of the cost of construction of ships and ship repair services are formulated.

Based on the analysis of the identified problems the proposals for the development of an effective system of regulation and cost determination, as well as the creation of an industry information base of prices and technical characteristics for civil vessels, both domestic and foreign construction.

**Keywords:** price, government contract, regulatory and methodological documentation, flexible automated production, shipbuilding, ship repair, digital technology.

### Введение

Текущее положение дел в области нормативно-методического обеспечения предприятий судостроения и судоремонта, несмотря на проводимые изыскания, по-прежнему остается неудовлетворительным. Разобщенность в информационном обмене, отсутствие единого информационного отраслевого информационного пространства, устаревшая нормативно-методическая документация и отсутствие таковой для современных технологий и производственных материалов по-прежнему не позволяют полноценно реализовать принципы управления жизненным циклом продукции [1].

Любое предприятие, желая обеспечить себе определенную степень экономической безопасности, скрывает под завесой «коммерческой тайны» сведения о контрагентах, применяемых в производстве материалах, технологическом оборудовании и его компоновке, производственных технологиях, ценах на отдельные контракты и другие условия сделки. Публикуемая официальная отчетность часто является недостаточной ввиду закрытости и искаженности статистической информации, в том числе данных о плановой и фактической трудоемкости продукции, изменении стоимости и условий поставок, цены продукции, что в свою очередь осложняет возможность сопоставления плановых и фактических данных, а также их соответствие утвержденным нормативам.

Подавляющее большинство утвержденных отраслевых нормативов в области судостроения и судоремонта недоступны для простого пользователя. Информация о разрабатываемых нормативах является недостаточной.

Одним из наиболее достоверных источников информации для анализа настоящей проблематики служат протоколы совещаний специалистов судостроительной промышленности.

#### 1. Анализ проблемных вопросов при формировании цен на проектирование, строительство, ремонт и утилизацию судов

Большинство заказов в гражданском судостроении и судоремонте исходят от компаний с государственным участием, что позволяет анализировать порядок ценообразования на ресурсе единой информационной системы в сфере закупок.

Проблемы при заключении государственных контрактов, носят системный характер и сохраняются год от года.

В ходе анализа формирования цены при заключении государственных контрактов было определено, что в ряде случаев, начальная максимальная цена контракта, определенная одним или несколькими методами, больше, чем цена, предусмотренная в рамках государственной программы/подпрограммы. В результате такого подхода к оценке стоимости объекта, подрядчик вынужден снижать цену, работая с минимальной

величиной рентабельности, что резко занижает его возможности по дальнейшему развитию производственных мощностей.

Дальнейший анализ показал, что цена контракта меняется в редких случаях, которые обусловлены внесением изменений в техническое задание. Большинство закупок осуществляется у единственного поставщика продукции, что объясняется спецификой судостроительной отрасли.

Анализ процесса формирования цен в проектных, судостроительных и судоремонтных организациях позволил выявить ряд актуальных проблем, которые можно сгруппировать следующим образом:

1. Устаревшие нормативы времени труда для ремонта и модернизации судов, в том числе отсутствие нормативно-методических рекомендаций по учету потерь рабочего времени при переезде к месту ремонта судов;
2. Отсутствие нормативов времени труда для современных индустриальных технологий и судов из композитных материалов;
3. Отсутствие нормативов времени на утилизацию судов;

Мировая практика показывает, что композитные материалы нашли широкое применение в судостроении, и их доля продолжает расти. Отчет Transparency Market Research показывает, что мировой спрос на судостроительные композиты оценивается в \$954,6 млн, а к 2019 году он достигнет показателя \$1,55 млрд [2].

Отсутствие современных укрупненных нормативов времени на изготовление корпусов и корпусодостроечные работы при постройке судов из композитных материалов существенно осложняют определение и снижают достоверность оценки трудоемкости подобных работ.

Необходимо отметить и отсутствие разработанных унифицированных для отрасли программ расчета трудоемкости работ в разрезе планово-учетных единиц по каждому виду производств, обеспечивающие функционирование в едином информационном пространстве. В настоящее время, предприятия пользуются различными программными продуктами, адаптируя их к производствам и к имеющимся CAD/CAM системам.

При рассмотрении проектов цены ремонта ставится под сомнение нормативная база для определения трудоемкости. Также не учитывается то обстоятельство, что при переезде к месту ремонта, проходит значительная доля потерь времени, в связи с тем, что большая часть ремонтируемого флота находится вне территории завода.

Еще одной актуальной проблемой является отсутствие перечня необходимых и достаточных документов, подтверждающих расчет цены комплектующего изделия (поставки) импортного производства, закупаемого у посредника-резидента РФ, что порождает двойное толкование документов с одной стороны и отсутствие возможности таких

поставок на всех стадиях жизненного цикла судна с другой.

Отсутствует нормативно-методическая база по формированию цены на ремонт судов и объектов морской техники для государственных нужд.

Отсутствуют нормативно-методические документы, позволяющие осуществлять корректировку договорной стоимости после выявления фактического объема работ, определенных по результатам дефектации.

При расчете цены затратным методом определенные вопросы возникают при отнесении на себестоимость расходов на ходовые испытания.

Расчет трудоемкости выполнения проектных работ и стоимости судна по параметрическим зависимостям оставляет без внимания качественные составляющие судна, такие как:

- новизна объекта в целом;
- новизна отдельных технических решений;
- специальные требования заказчика к качеству объекта;
- организационно-технологический уровень организации и др.

Что касается значения величины трудоемкости выполнения проектных работ, то она зависит от множества других, не оцениваемых количественно факторов, включая такие из них, как поисковый/творческий характер работ, особенно на ранних стадиях проектирования, неопределенность по времени решения задач и т.п.

Проведенный анализ текущего состояния нормирования труда на предприятиях судостроения и судоремонта показывает ряд проблемных моментов:

- разработанные и принятые к реализации нормативы зачастую не внедрены на предприятия и остаются номинальными;
- действующая методическая и нормативная база по расчетам нормативов времени по элементам производственного процесса существенно отстает от современных требований и актуальных условий труда;
- отсутствуют нормативы времени на работы по всем этапам жизненного цикла кораблей, судов, корабельных систем и механизмов новых поколений;
- отсутствуют обоснованные нормативы времени на обновленные современные технологии смежных производств и производственные мощности (подготовка к производственному процессу, приобретение и установка нового оборудования, инструмента, применение новых материалов).

Еще одна проблема, которую предстоит решить - это отсутствие нормативов на утилизацию судов и морской техники.

## 2. Возможные пути решения проблемных вопросов при формировании цен

В условиях перехода к новой индустриальной модели необходимо обеспечить разработку актуальных нормативов времени труда на технологии смежных производств и производственные мощности (подготовка к производственному процессу, закупка и внедрение

нового оборудования, применение новых видов инструмента).

Подобные работы в настоящее время и на ближайшую перспективу необходимо предусмотреть в перечне научных исследований, выполняемых в рамках государственной программы развития судостроения.

Решение этой задачи можно осуществлять в двух направлениях:

- путем поиска межотраслевых нормативов, при непосредственном участии либо координации подобных разработок ВНИИ «Труда»;
- разработкой и выпуском на предприятии локальных нормативов, либо заказ таких нормативов на хоздоговорной основе.

Например, для предприятий, осуществляющих выпуск судов и конструкций с применением композитных материалов необходимо разработать актуальные нормативы времени на изготовление корпусов, конструкций и корпусодостроечные работы.

В настоящее время в АО «ЦТСС» уже разработан и утвержден сборник нормативов времени «Укрупненные нормативы времени. Изготовление и установка корпусных конструкций их стеклопластика. Единичное и мелкосерийное производство. ГКЛИ.3530-056-2017». Известно, что в 2018 году была предусмотрена разработка «Укрупненные нормативы времени. Изготовление корпусов и корпусодостроечные работы при постройке судов из стеклопластика. Единичное и мелкосерийное производство».

АО «СНСЗ» провело хронометражные наблюдения при изготовлении корпуса проекта 12700 методом вакуумной инфузии [3]. Продолжение разработок в данном направлении, позволит АО «ЦТСС» разработать нормативы трудоемкости для серийного строительства судов из стеклопластика, а также иных полимерных композиционных материалов.

Разработка унифицированных отраслевых программ расчета трудоемкости работ в разрезе ПУЕ по каждому виду производств, обеспечивающих функционирование в едином информационном пространстве, является необходимой и в тоже время дорогостоящей разработкой, которая предварительно потребует решения следующего ряда проблем:

1. Не существует идентичных предприятий, то есть имеющих одинаковые виды производств и количество цехов, а значит, потребуется разработка массива данных по возможному составу производств.
2. По той же причине, что указана в п.1 на сегодняшний день не существует единой отраслевой системы учета и управления трудоемкостью. На каждом предприятии есть свои особенности.

Разработка единой программы возможна при условии ее использования на всех предприятиях, что в свою очередь потребует от организаций использования единой информационной системы, либо такая программа должна обладать возможностью экспорта данных в корпоративные информационные системы предприятий.

Проблема учета потерь рабочего времени при переезде к месту ремонта судов требует

дополнительного рассмотрения. Необходимо разработать единый нормативный документ определяющий порядок оплаты времени проезда к месту выполнения ремонтных работ, с учетом опыта, полученного в ходе работ по ГОЗ, для гражданского судостроения.

Ввиду отсутствия правовых и нормативных документов, вполне возможно спроецировать действие Решения («Об уточнении требований государственных контрактов в части поставок комплектующих изделий иностранного производства для ремонта и сервисного обслуживания кораблей и судов ВМФ»), в части содержания конкретных требований к документам на нормативно-правовые акты для гражданского судостроения и все стадии жизненного цикла судна, а не только на ремонт и сервисное обслуживание, как это предусмотрено Решением.

Необходимо разработать нормативно-методическую документацию по формированию цены на ремонт судов и объектов морской техники для государственных нужд, в которых было бы четкое разделение материально-технической номенклатуры на материалы, покупные комплектующие изделия, ЗИП и др., так как это предусмотрено проектом методики определения цен на суда и морскую технику для государственных нужд.

Невозможно определить фиксированную цену ремонта до проведения дефектации. В связи с этим в отношении ремонта и модернизации наиболее важную роль играют этапы дефектации. Планировать финансирование и сроки с учетом проведения полной дефектации (или после её проведения) с учетом сроков заключения договоров на поставки всех комплектующих и ЗИП, а также сроков технологического цикла.

В АО «ЗСРЗ» изложенные выше положения реализуются на практике. Ремонтные ведомости, формируемые личным составом, содержат все пожелания Заказчика. Эти ведомости рассматриваются совместно представителями Заказчика и предприятия и определяются те работы, которые будут выполняться исходя из объемов выделенного финансирования. Затем проводится дефектация и по её результатам уточняется содержание и объём ремонтных работ – уточненный ПСОР, который утверждается Службой эксплуатации и ремонта флота[4].

Для устранения недостатков использования параметрического метода при планировании трудоемкости выполнения проектных и строительных работ ввести поправочные коэффициенты, учитывающие как технические показатели изделия, так и его качественные характеристики (творческая нагрузка, новизна работ, организационно-технологический уровень, сроковая дисциплина и др.) [5]. Организационно-технологический уровень характеризует качество и прогрессивность применяемых технологий, ведь трудоемкость проектирования судна методами, характерными для конца 80х годов будет несопоставима с трудоемкостью проектирования современными программными продуктами, равно как и производство судов тех лет невозможно сравнивать с современными гибкими

автоматизированными производствами верфей, активно применяющими цифровые технологии [6].

Вопрос об отнесении расходов на ходовые испытания, которые являются составной частью технологического процесса строительства судна, может быть решен путем уточнения действующей нормативно-правовой документации. Учитывая особенности испытаний судов и объектов морской техники, целесообразно разработать отдельное положение по оплате работников, участвующих в испытаниях, командировочных (суточных) расходов, связанных с испытаниями, расходов на питание членов сдаточных команд в период проведения таких испытаний.

Выявление ресурсного потенциала, тщательная проработка механизмов организации и управления производственной деятельностью хозяйствующего субъекта в совокупности с четкой и своевременной реализацией установленных принципов на каждом уровне управления позволяет привести в соответствие трудозатраты и оплату труда на предприятии. В настоящее время необходим комплексный подход к централизованному возрождению системы нормирования труда, который должен предполагать следующие работы:

- анализ конструктивно-технологических параметров применяемого на предприятиях отрасли оборудования;
- утверждение соответствия профессионально-квалификационных и иных характеристик состава работников;
- составление типовой технологической карты с указанием требуемого числа рабочих мест и количества работников, их квалификационного состава на каждом групповом или индивидуальном рабочем месте с учетом требуемого уровня автоматизации производственного процесса, исходя из целей создания конкурентоспособной судостроительной продукции и оказания конкурентоспособных услуг в отрасли;
- установка нормативов и показателей продолжительности и эффективности каждого локального и всего процесса производства;
- вычисление ключевых факторов трудозатрат;
- определение требуемой численности персонала;
- построение алгоритма и математической модели зависимости трудозатрат и утвержденных ключевых значений факторов;
- оформление нормативной и методической документации по отрасли и др.

В целях осуществления контроля над ценообразованием в судостроительной промышленности необходимо обеспечить создание отраслевой информационной базы цен и технических характеристик на гражданские суда, как отечественной, так и зарубежной постройки. Создание такой информационной базы в АО «ЦТСС» будет способствовать повышению эффективности деятельности предприятий отрасли и отраслевых органов управления, а также объективному определению начальной максимальной цены контракта (НМЦК).

При формировании необходимой информационной базы следует решить следующие задачи:

- детальная проработка и информационное моделирование полного цикла создания конкурентоспособной судостроительной продукции посредством информационных технологий (IT) и созданного программного обеспечения (ПО), базирующегося на современных методах производства, традиционной и инновационной материально – технической базе и актуальных приемах нормирования труда в тяжелой промышленности;
- создание актуальной согласованной системы оплаты труда и материального стимулирования персонала, которая послужит существенным фактором в ценообразовании на продукцию отрасли, как на свободном рынке, так и при государственных и муниципальных закупках, при участии в конкурсах и тендерах;
- определение гибкой системы корректировок оплаты труда в части касающейся премиальных выплат при выявленном отклонении фактических трудозатрат от плановых;
- составление и внедрение четких и емких алгоритмов всего комплекса процессов (организации, планирования, учета и контроля корректировки технологической трудоемкости к плановой; прогнозирования и определения, корректировки и актуализации цен на отдельные элементы и конечную судостроительную продукцию и услуги отрасли).

### Заключение

В результате проведенного исследования были достигнуты следующие результаты, а также сделаны выводы и предложения:

- для повышения качества разрабатываемой документации необходимо использовать базу межотраслевых нормативов и внутреннюю нормативную базу локальных предприятий, так как данные база созданы частично, неактуальны, или просто отсутствуют, их необходимо разработать и внедрить.

- ввиду особой сложности в определении фиксированной цены на ремонтные работы, требуется регламентированная детализация этапов ремонта и модернизации судостроительных изделий, что обозначено в проекте методики определения цен на суда и морскую технику для государственных нужд.

При формировании полной и достаточной информационной базы следует проработать и тщательно детализировать полный цикл создания конкурентоспособной судостроительной продукции с использованием современных методов производства, инновационных IT-технологий и программных продуктов с учетом согласованности с системой оплаты труда и гибкой системы корректировок, что позволит применять четкие алгоритмы для управления всеми предусмотренными процессами в ходе судостроительных и судоремонтных работ, в том числе и в аспекте ценообразования на отдельные работы и услуги.

Авторы благодарят сотрудников АО ЦТСС и ООО «ЦИТ»Мёбиус», принимавших непосредственное участие в проведенном исследовании.

### Литература

1. Абрамов А.В., Когонов М.В., Хмара Д.С. Определение цен на судостроительную продукцию. // Морские интеллектуальные технологии. 2016. Т. 1. № 2 (32). С. 102-110.
2. ГК «Композитные решения» - [Электронный ресурс]. Конференция «Применение композиционных материалов в судостроении» - Режим доступа: <https://compositesolutions.ru/sobyitiya/konferentsiya-primenenie-kompozitsionnyih-materialov-v-sudostroenii-neobhodimo-sozдание-tsentra-kompetentsiy-v-sankt-peterburge/>
3. ХК Композит - [Электронный ресурс]. Опыт изготовления конструкций и корпусов кораблей из ПКМ - Режим доступа: <http://www.hccomposite.com/upload/iblock/3be/3be96be19ed64e5ff247bd976d74f0c6.pdf>
4. Протокол регионального совещания специалистов судостроительной промышленности Крыма от 21.02.2018.
5. Абрамов А.В., Загородников М.А. Определение стоимости проектных работ с учетом количественных и качественных характеристик проекта судна. // Известия Дальневосточного федерального университета. Экономика и управление. 2017. № 1 (81). С. 3-11.
6. Хмара Д.С., Фирсова А.В. Оценка потенциала создания гибкого цифрового производства на базе онежского судостроительно-судоремонтного завода и возможности проецирования полученного опыта на другие предприятия отрасли. // Экономика и управление. 2018. № 4 (150). С. 51-60.

### References

1. Abramov A.V., Koginov M.V., Khmara D.S. Opredelenie cen na sudostroitel`nyuyu produkciyu. Morskije intellektual`ny`e tehnologii. 2016. T. 1. № 2 (32). S. 102-110.
2. GK «Kompozitny`e resheniya» - [E`lektronny`j resurs]. Konferenciya «Primenenie kompozitsionny`x materialov v sudostroenii» - Rezhim dostupa: <https://compositesolutions.ru/sobyitiya/konferentsiya-primenenie-kompozitsionnyih-materialov-v-sudostroenii-neobhodimo-sozдание-tsentra-kompetentsiy-v-sankt-peterburge/>
3. ХК Композит - [E`lektronny`j resurs]. Opy`t izgotovleniya konstrukcij i korpusov korablej iz PKM - Rezhim dostupa: <http://www.hccomposite.com/upload/iblock/3be/3be96be19ed64e5ff247bd976d74f0c6.pdf>
4. Protokol regional`nogo soveshhaniya specialistov sudostroitel`noj promy`shlennosti Kry`ma ot 21.02.2018.



5. Abramov A.V., Zagorodnikov M.A. Opredelenie stoimosti proektny`x rabot s uchetom kolichestvenny`x i kachestvenny`x karakteristik proekta sudna. Izvestiya Dal`nevostochnogo federal`nogo universiteta. E`konomika i upravlenie. 2017. № 1 (81). S. 3-11.
6. Khmara D.S., Firsova A.V. Ocenka potentsiala sozdaniya gibkogo cifrovogo proizvodstva na baze onezhskogo sudostroitel`no-sudoremontnogo zavoda i vozmozhnosti proecirovaniya poluchennogo opy`ta na drugie predpriyatiya otrasli. E`konomika i upravlenie. 2018. № 4 (150). S. 51-60.

УДК 658.5+338.5

## ПУТИ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА ОТРАСЛИ В ЦЕЛЯХ ЭКСПЕРТНО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЗРАБОТКИ НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

**Алексей Васильевич Абрамов**

профессор, доктор экономических наук, профессор кафедры экономики судостроительной промышленности Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3.  
e-mail: abr\_ek@mail.ru

**Анна Валентиновна Фирсова**

доцент кафедры управления судостроительным производством  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3  
e-mail: firsova-a-v@mail.ru

**Дмитрий Сергеевич Хмара**

доцент, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики судостроительной промышленности Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3.  
e-mail: dskh@corp.smtu.ru

### Аннотация

Рассмотрено текущее положение дел в судостроительной промышленности, связанное с разработкой норм труда и ценообразованием. Определены цели и задачи мониторинга показателей трудоемкости и цен на работы, услуги и материальные ресурсы, как инструмента информационного пространства и его роль при осуществлении государственной политики, а также выработки и принятии решений в сфере судостроения и судоремонта

Обозначено место современных цифровых технологий в судостроении. Ориентированность на цифровизацию полного жизненного цикла продуктов судостроительной отрасли и локальных циклов в процессе создания изделий предоставит актуальные и перспективные способы определения трудоёмкости, установления цен на все виды работ по этапам проектирования, строительства, ремонтных работ, модернизации, реновации, а также утилизации судостроительной продукции и объектов морской инфраструктуры.

На основании проведенного анализа, сформулированы предложения по развитию информационной системы и экспертно-аналитического сопровождения при нормировании труда и определении затрат.

**Ключевые слова:** информационное пространство, судостроение, экспертно-аналитическое обеспечение, мониторинг, трудоемкость, стоимость, цифровые технологии, базы данных.

## THE DEVELOPMENT OF AN INFORMATION SPACE INDUSTRY WITH THE AIM OF THE EXPERT-ANALYTICAL SUPPORT OF DEVELOPMENT OF NORMATIVE-METHODICAL DOCUMENTATION

**Alexey V. Abramov**

the professor, Dr.Sci.Econ., head of the department of economics of the shipbuilding industry  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
e-mail: abr\_ek@mail.ru

**Anna V. Firsova**

the associate professor of the department of management of the shipbuilding industry  
State Marine Technical University of Saint Petersburg  
Lotsmanskaya Str. 3, St. Petersburg, Russian Federation, 190008  
e-mail: firsova-a-v@mail.ru

**Dmitriy S. Khmara**

the associate professor, Cand. Sci.Econ., associate professor of the department of economics of the shipbuilding industry  
State Marine Technical University of Saint Petersburg  
Lotsmanskaya Str. 3, St. Petersburg, Russian Federation, 190008  
e-mail: dskh@corp.smtu.ru

### Abstract

The current state of Affairs in the shipbuilding industry related to the development of labor standards and pricing is considered. The goals and objectives of monitoring indicators of labor intensity and prices for work, services and material resources as a tool of information space and its role in the implementation

of public policy, as well as the development and decision-making in the field of shipbuilding and ship repair are also defined.

The place of modern digital technologies in providing the processes of estimation of labor intensity, control of terms of construction of the vessel and implementation of budgets is designated.

On the basis of the analysis, proposals for the development of information system and expert-analytical support in the regulation of labor and cost determination are formulated.

**Keywords:** information space, shipbuilding, expert-analytical support, monitoring, labor intensity, cost, digital technologies, data base.

### Введение

Документы стратегического планирования среди главных угроз, препятствующих развитию морских и речных транспортных систем, выделяют технологическую отсталость судостроительных предприятий, низкий уровень их вертикальной интеграции, длительные сроки ремонта и сервисного обслуживания судов, а также высокую стоимость проектирования объектов водного транспорта. Ключевую роль в ликвидации таких проблем будет играть развитие информационно-коммуникационных технологий [1].

Использование цифровых производственных технологий, роботизированных систем, создание цифровых двойников, применение современных материалов и обработка большого объема данных будут способствовать сокращению научно-технологического разрыва с одной стороны, но потребуют финансовых вложений, которые предстоит окупить и пересмотра нормативов времени труда, а также стоимости продукции и услуг судостроительных предприятий с другой [2].

В качестве примера, демонстрирующего превосходство современных технологий производства над традиционными, рассмотрим преимущества применения инновационных методов гибридной лазерно-дуговой сварки (ГЛДС) над автоматической дуговой (АДС). Первое преимущество состоит в значительном снижении расхода материалов. АДС потребляет в три раза больше сварочной проволоки за счет большего угла и меньшей точности раздела кромок. Второе преимущество ГЛДС перед АДС – значительное сокращение времени изготовления, что положительно сказывается на энергопотреблении (изготовление одного метра таврового соединения с применением ГЛДС требует потребление энергии на 1,03 кВт меньше, чем при АДС) и расходе защитного газа. Таким образом, применение технологии ГЛДС позволяют до 6 раз сократить использование энергии и материалов по сравнению с АДС. Третье преимущество ГЛДС также определяется сокращением трудоемкости процесса, а значит, оказывает непосредственное влияние на требуемое количество производственного персонала. Как показывают исследования в этой области, на производство одного метра таврового соединения в сравнении с АДС приходится в два раза меньше затрат на оплату труда основных производственных рабочих, сокращаются общепроизводственные и общезаязыственные расходы, что в свою очередь выражается в снижении операционных расходов и повышении эффективности производственной деятельности [3].

С целью анализа, усреднения, прогноза, формирования норм труда, а также расценок на работы и услуги, их дальнейшего использования при

расчете сметной стоимости необходимо обеспечить экспертно-аналитическое сопровождение процесса определения трудоемкости и установления цен на работы и услуги судостроительной промышленности.

Экспертно-аналитическое сопровождение должно представлять собой специально организованную, систематическую регистрацию текущих показателей трудоемкости и цен материальных ресурсов, потребляемых в ходе строительства, ремонта, модернизации и утилизации судов.

Регулярный мониторинг показателей трудоемкости и цен на работы, услуги и материальные ресурсы будет способствовать осуществлению государственной политики в сфере судостроения и судоремонта, облегчать выработку и принятие решений, соответствующих достижению целей, указанных в документах отраслевого стратегического планирования.

Организации и предприятия судостроительной отрасли, используя результаты мониторинга, смогут решать инвестиционные задачи, определять сметную стоимость, осуществлять анализ, планирование и контроль, проводить оценку стоимости судов и объектов морской техники.

Экспертно-аналитическое сопровождение должно быть адаптировано к самым современным и эффективным технологиям цифровой экономики, создавая единую интегрированную среду информационной поддержки полного жизненного цикла судна. Такая среда позволит проводить более точную оценку трудоемкости и стоимости работ и предоставит возможность их оптимизации на каждом этапе жизненного цикла.

Цифровизация всех этапов жизненного цикла продукции судостроения позволит открыть принципиально новые возможности для определения трудоемкости и установления цен на проектирование, строительство, ремонт, модернизацию и утилизацию судов и объектов морской техники.

### Мероприятия по развитию экспертно-аналитического сопровождения в области ценообразования и трудоемкости

В начале текущего десятилетия возобновлена разработка и пересмотр отраслевых нормативов по труду в судостроении.

Результатом работ, проводимых в рамках федеральных целевых программ, должен стать базовый комплект сборников нормативов времени на типовые работы, операции и их элементы. Комплект будет состоять из более чем ста десяти сборников, что значительно меньше, чем в СССР, где в судостроении и судоремонте действовало более пятисот нормативных документов по труду.

Экспертно-аналитическое сопровождение процесса определения трудоемкости и установления

цен на работы и услуги судостроительной промышленности должно представлять собой специально организованную, систематическую регистрацию текущих показателей трудоемкости, цен материальных ресурсов, потребляемых в ходе строительства, ремонта, модернизации и утилизации судов. Шаги, осуществляемые в данном направлении, позволят обобщать, усреднять и анализировать получаемые данные и на их основании осуществлять прогноз и формирование расчетных показателей, а также использовать их в расчетах сметной стоимости[4].

Проведение такого рода мониторинга будет способствовать решению органами исполнительной власти следующих задач:

1. Осуществление государственной политики в сфере судостроения и судоремонта;
2. Выработка и принятие решений, соответствующих достижению целей, указанных в документах отраслевого стратегического планирования;
3. Обеспечение сметно-нормативной базы трудоемкости и ценообразования при строительстве, ремонте, модернизации и утилизации судов (показатели трудоемкости и текущие цены на материальные ресурсы);
4. Формирование информационного пространства текущих цен материальных ресурсов и показателей трудоемкости;
5. Создание и ведение электронной базы данных текущих цен;
6. Проведение анализа и разработка системного подхода к определению текущих цен на материалы, применяемые в судостроении и судоремонте;
7. Осуществлению прогнозирования цен;
8. Выработке нормативов трудоемкости.

Положительные аспекты от использования мониторинга получают и предприятия судостроительной отрасли, в частности им будут доступны:

1. Выработка и принятие решений, в соответствующих сферах деятельности;
2. Решение инвестиционных задач;
3. Проведение расчетов стоимости проектирования, строительства, ремонта, модернизации и утилизации судов;
4. Анализ, планирование и контроль;
5. Отбор наиболее экономичных поставщиков;
6. Расчет договорных цен;
7. Оценка стоимости судов.

Экспертно-аналитическое сопровождение должно основываться на следующих принципах:

1. Достоверности (обеспечение полноты, качества и высокой степени верификации информации, получаемой в ходе мониторинга);
2. Актуальности (информация, используемая в рамках мониторинга, объективна и отражает текущее состояние рынка материалов, используемых в судостроении);
3. Постоянства (мониторинг осуществляется на постоянной основе с заданной периодичностью);
4. Единства (мониторинг осуществляется по единым правилам);
5. Доступности (информация и результаты, полученные в ходе мониторинга, должны стать доступными для научно-исследовательских

организаций, предприятий судостроения и судоремонта, проектных организаций, органов исполнительной власти, и других заинтересованных сторон).

Мониторинг осуществляется посредством сбора, электронной системы обработки, анализа и хранения информации. По окончании периода мониторинга формируются результаты в виде:

1. Показателей текущих цен на материальные ресурсы, применяемые в судостроении, в том числе:
  - по регионам, где расположены предприятия судостроительной промышленности;
  - по государственному заказу;
  - по видам конструкций.
2. Средние цены;
3. Расчетные цены (определенные с помощью индексов цен);
4. Отклонения цен:
  - абсолютное отклонение;
  - относительное отклонение.
5. Текущие показатели трудоемкости, в том числе:
  - по регионам, где расположены предприятия судостроительной промышленности;
  - по типу судов;
  - по виду производства (проектирование, строительство, ремонт, модернизация, утилизация судов);
    - по виду работ;
    - по государственному заказу.
6. Запланированные показатели трудоемкости;
7. Отклонения показателей трудоемкости:
  - абсолютное отклонение;
  - относительное отклонение

Показатели текущих цен можно дифференцировать по стадиям мониторинга:

- стадия сбора – показатели индивидуального уровня текущих цен на конкретизированные виды материальных ресурсов по конкретным предприятиям;
- стадия обработки – показатели средних текущих цен.

Информация, полученная в ходе мониторинга, является основой для формирования цен на ресурсы, используемых при оценке стоимости строительства, ремонта, модернизации и утилизации судов.

Перечень предприятий, подлежащих мониторингу, должен включать в себя все предприятия и организации занятые в процессе проектирования, строительства, ремонта, модернизации и утилизации судов и обеспечивать следующую группировку по следующим признакам:

1. Ведомственная принадлежность, способов хозяйствования и форма собственности;
2. Регион местонахождения;
3. По масштабу (малые, средние и крупные предприятия);
4. По организационно-технологическому уровню;
5. По уровню специализации.

Лучшим источником информации о ценах являются крупные и средние предприятия.

Для более достоверного определения стоимости материальных ресурсов и показателей

трудоемкости, следует предусмотреть возможность аудита предоставляемых данных.

Ведение электронной «он-лайн» базы данных, хранение и обработку исходной и расчетной информации целесообразно поручить организации, которая обладает соответствующим многолетним опытом в получении, обработки отраслевой информации и формировании на основе ее анализа отчетно-информационной документации.

Одной из организаций, отвечающих подобным требованиям, является Государственный научный центр Российской Федерации АО «Центр технологии судостроения и судоремонта» (ГНЦ РФ АО «ЦТСС»).

При выполнении анализа данных, полученных в ходе мониторинга, могут быть достигнуты следующие результаты:

1. Уточнение причин отклонения трудоемкости работ;
2. Нормирование трудоемкости работ;
3. Уточнение причин при значительных изменениях цен в сравнении с прошлым периодом;
4. Отслеживание максимальных и минимальных границ текущих цен поставщиков однородных ресурсов;
5. Исключение «случайных» и «единичных» поставщиков с очень низким или очень высоким уровнем цены, как не отражающих реальную динамику цен;
6. Отслеживание и сопоставление данных, получаемых из различных внешних источников с результатами собственного мониторинга. К внешним источникам информации относятся, отраслевые организации и ассоциации, органы статистики, маркетинговые или консалтинговые агентства и другие компетентные организации;
7. Анализ индексов цен, динамики их изменения и влияющих факторов;
8. Анализ чувствительности сметной стоимости от изменений средних текущих цен, полученных в результате мониторинга.

### Заключение

Для удовлетворения изменяющихся потребностей судостроительной отрасли в объективной информации необходимо:

1. Создать централизованную систему сбора, обработки и передачи данных о трудоемкости и стоимости материальных ресурсов;
2. Создать глобальную информационную базу данных, обеспечивающую формирование, управление и защиту информации;
3. Обеспечить внедрение стандартов соответствующих международным требованиям;
4. Обеспечить повышение гибкости системы в зависимости от спроса на информацию.

Экспертно-аналитическое сопровождение должно соответствовать следующим базовым требованиям к технологии:

1. Наличие технологии клиент-сервер, которая способна обеспечить работу неограниченного числа пользователей, как в локальной сети, так и в сети интернет;
2. Поддержка работы с неограниченным количеством баз данных;
3. Хранение и расширенный поиск информации о ценах и трудоемкости работ;

4. Наличие древовидной структуры данных с широкими возможностями сортировки или сортировки, в том числе по коду ресурса или трудоемкости;

5. Формирование организаций, продукции, ресурсов и др. по группам;

6. Наличие подробной информации по поставщикам ресурсов, судостроительным предприятиям возможности применения фильтров поиска по местоположению, классификационным группам, выхода на официальный сайт и обратной связи;

7. Быстрый и удобный ввод цен, многочисленные сервисные функции;

8. Возможность анализ данных и их контроля на предмет соответствия действительности;

9. Факторный анализ изменения стоимости;

10. Факторный анализ изменения трудоемкости;

11. Расчет средних цен, наличие индексов цен видам, группам, подгруппам материалов.

12. Возможность логического определения недостающих цен на ресурсы;

13. Расчет трудоемкости проектирования, строительства, ремонта, модернизации и утилизации судов;

14. Расчет строительной стоимости судов и объектов морской техники, стих модернизации и ремонта в текущих ценах;

15. Разносторонние возможности настройки интерфейса пользователя;

16. Наличие генератора отчетов, их вывода на печать и возможности редактирования;

17. Возможность импорта данных;

18. Возможность экспорта в базы данных специализированных программ для проектирования и оценки стоимости строительства и ремонта судов, а также в наиболее популярные форматы документов (WORD, EXCEL, PDF...).

В условиях расширения информационной базы нормативов труда и цен на строительство и ремонт судов становится возможным разработка программного продукта, способного при наличии основных данных технического задания, (основные технико-эксплуатационные характеристики судна, финансовые условия и др.) производить предварительную оценку стоимости строительства или ремонта судна. Погрешность подобной оценки будет зависеть от полноты исходных данных и качества информационной базы.

С целью эффективного использования предлагаемых мероприятий необходимо также наличие одновременно действующих:

1. Единых нормативных документов по ценообразованию проектных работ и строительства, модернизации, ремонта и утилизации судов;

2. Нормативных документов о порядке согласования проектов судов, проведения экспертизы по величине стоимости проектирования, строительства, модернизации и ремонта судов, по проведению технической экспертизы проектной документации, утверждения проектов, по организации наблюдения за строительством судов, включая проведение испытаний, приемки и сдачи судов;

3. Единого нормативного документа, определяющего состав документов для включения в конкурсную документацию на строительство судов

для целей определения стоимости и сроков строительства этих судов.

Применение современных цифровых технологий обеспечит возможность широкомасштабного моделирования процессов. Постоянная поддерживаемая связь между структурой судна, сроками выполнения работ и необходимыми ресурсами даёт возможность не только оценить трудоёмкость, но и позволяет осуществлять контроль выполнения бюджетов и сроков постройки судна при переходе от виртуального мира к реальному производству.

Все вышеперечисленное позволит не только определять и контролировать бюджетные параметры проекта, но и при появлении негативных признаков с минимальными потерями остановить заранее убыточный проект на стадии виртуального моделирования, имея при этом достоверную информацию для принятия управленческих решений.

Авторы благодарят сотрудников АО ЦТСС и ООО «ЦИТ»Мёбиус», принимавших непосредственное участие в проведенном исследовании.

#### Литература

1. Справочная информация «КонсультантПлюс» - [Электронный ресурс]. "Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года" - Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_157978/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_157978/)
2. Справочная информация «Гарант» - [Электронный ресурс]. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации (утв. Указом Президента РФ от 1 декабря 2016 г. № 642) - Режим доступа: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71451998/#1000>
3. Туричин Г.А. Гоголюхина М.Е. Мамедова Л.Э. Инновационные лазерные технологии на судостроительном производстве: экономические, технологические и организационные аспекты // Журнал «Азимут научных исследований: экономика и управление» №4/2018. С. 316-318
4. Технический отчет (промежуточный) о составной части работы «Разработка предложений по методологии и организации экспертно-аналитического сопровождения процесса определения трудоемкости и установления цен на проектирование, строительство, ремонт, модернизацию и утилизацию судов». ООО «ЦИТ «МЁБИУС», Санкт-Петербург, 2017
5. Абрамов А.В., Ваучский А.Н., Загородников М.А., Хмара Д.С. Практика Определения Затрат и установления цен на гражданскую морскую технику. // Морской вестник. 2017. № 1 (61). С. 43-47.
6. Андреева Т.А., Хмара Д.С., Фирсова А.В. Информационно-аналитическое обеспечение реализации долгосрочной стратегии развития транспортной системы в арктике. // Научный диалог: Молодой ученый Сборник научных трудов по материалам XIII международной научной конференции. 2018. С. 16-19.

#### References

1. Spravochnaya informaciya «Konsul`tantPlyus» - [E`lektronny`j resurs]. "Prognoz nauchno-texnologicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda" - Rezhim dostupa: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_157978/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_157978/)
2. Spravochnaya informaciya «Garant» - [E`lektronny`j resurs]. Strategiya nauchno-texnologicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii (utv. Ukazom Prezidenta RF ot 1 dekabrya 2016 g. № 642) - Rezhim dostupa: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71451998/#1000>
3. Turichin G.A. Gogolyuxina M.E. Mamedova L.E`. Innovacionny`e lazerny`e tehnologii na sudostroitel`nom proizvodstve: e`konomicheskie, tehnologicheskie i organizacionny`e aspekty`. Zhurnal «Azimut nauchny`x issledovanij: e`konomika i upravlenie» №4/2018. S. 316-318
4. Texnicheskij otchet (promezhutochny`j) o sostavnoj chasti raboty` «Razrabotka predlozhenij po metodologii i organizacii e`kspertno-analiticheskogo soprovozhdeniya processa opredeleniya trudnoemkosti i ustanovleniya cen na proektirovanie, stroitel`stvo, remont, modernizaciyu i utilizaciyu sudov». ООО «CIT «MYoBIUS», Sankt-Peterburg, 2017
5. Abramov A.V., Vauchskij A.N., Zagorodnikov M.A., Khmara D.S. Praktika Opredeleniya Zatrata i ustanovleniya cen na grazhdanskuyu morskuyu tekhniku. Morskoj vestnik. 2017. № 1 (61). S. 43-47
6. Andreeva T.A., Khmara D.S., Firsova A.V. Informacionno-analiticheskoe obespechenie realizacii dolgosrochnoj strategii razvitiya transportnoj sistemy` v arktike. Nauchny`j dialog: Molodoy ucheny`j Sbornik nauchny`x trudov po materialam XIII mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. 2018. S. 16-19.

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

УДК 62-713.5, 621.039.534...24

**РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ЗАБОРТНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА****Анастасия Васильевна Аполлова**

старший преподаватель кафедры энергетики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: an.vas.petrova@gmail.com

**Роман Александрович Иванов**

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник  
Крыловский государственный научный центр  
196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44  
e-mail: R\_Ivanov@rambler.ru

**Екатерина Сергеевна Игнатьева**

студент группы 2301  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: kate.ignateva98@mail.ru

**Вячеслав Вячеславович Кожемякин**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: kogh2012@yandex.ru

**Аннотация**

В работе рассматривается забортный теплообменный аппарат системы пассивного отвода тепла реакторной установки. Работа посвящена исследованию конструктивных параметров и определению числа параллельных рядов труб в секциях забортного теплообменника с целью достижения минимального объема этого теплообменника.

Для достижения поставленной цели созданы математическая модель, алгоритм и программа для ЭВМ для конструктивного расчета забортного теплообменного аппарата. Выполнено расчетно-теоретическое исследование конструктивных параметров забортного теплообменника с различным числом параллельных рядов труб и общим числом слоев. В ходе работы изучено влияние подъемного канала и гидравлического сопротивления на объем забортного теплообменника, определены зависимости горизонтального шага труб и объема теплообменника от отношения ширины к длине забортного теплообменного аппарата. Установлена взаимосвязь габаритов забортного теплообменного аппарата и числа параллельных труб в забортном теплообменном аппарате.

**Ключевые слова:** система пассивного отвода тепла, забортный теплообменник, естественная циркуляция, поперечное обтекание труб, габаритные размеры.

**COMPUTATIONAL AND THEORETICAL STUDY OF THE DESIGN  
CHARACTERISTICS OF AN OUTBOARD HEAT EXCHANGER****Anastasia V. Apollova**

Senior Lecturer, Department of Power Engineering  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: an.vas.petrova@gmail.com

**Roman A. Ivanov**

Dr.Sci.Tech, Professor, Chief Researcher  
"Krylov State Research Center"  
196158, St. Petersburg, Moskovskoye shosse, 44  
e-mail: R\_Ivanov@rambler.ru

**Ekaterina S. Ignatyeva**

student, group 2301  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: kate.ignateva98@mail.ru



**Vyacheslav V. Kozhemyakin**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Head of the Department of Power Engineering  
 St. Petersburg State Marine Technical University  
 190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
 e-mail: kogh2012@yandex.ru

**Abstract**

This paper reviews the outboard heat exchanger apparatus for passive heat removal of the reactor plant. The paper is devoted to the study of design parameters and determination of the number of parallel rows of tubes in sections of an outboard heat exchanger in order to achieve the minimum volume of this heat exchanger.

To achieve this goal, a mathematical model, an algorithm and a computer program have been created for the design calculation of an outboard heat exchanger. A theoretical calculation of the design parameters of the outboard heat exchanger with a different number of parallel rows of tubes and the total number of layers was carried out. In the course of the work, the influence of the riser and hydraulic resistance on the volume of the outboard heat exchanger was studied; the dependences of the horizontal tube pitch and the volume of the heat exchanger on the ratio of the width to the length of the outboard heat exchanger were determined. The interrelation between the dimensions of the outboard heat exchanger and the number of parallel tubes in the outboard heat exchanger was established.

**Keywords:** passive heat removal system, outboard heat exchanger, natural circulation, cross-flow, overall dimensions.

**Введение**

Исследованию и разработке систем пассивного отвода тепла (СПОТ) в настоящее время посвящено много работ. В основном внимание уделяется схемным решениям [1-4]. Вместе с тем, экспериментальные исследования на стенде «Бета-К-ТСН» на Приморской учебно-научной базе СПбГМТУ [5] показали, что существенное влияние на отвод тепла оказывает забортный теплообменник (ЗТО).

Целью работы является определение габаритных размеров ЗТО. Для достижения данной цели было выполнено расчетно-теоретическое исследование конструктивных параметров и определено число параллельных рядов труб ЗТО.

**1. Постановка задачи исследования**

В патенте [6] предложена конструкция теплообменного аппарата (см. рис. 1, 2), который состоит из горизонтальных секций идентичных между собой, в каждой из которых имеется несколько слоев труб. Трубы расположены в шахматном порядке. Находящиеся по бокам коллекторы собирают теплоноситель из труб первой секции и раздают по трубам другой секции. Сам теплообменный аппарат находится в кожухе, над которым располагается подъемный канал.

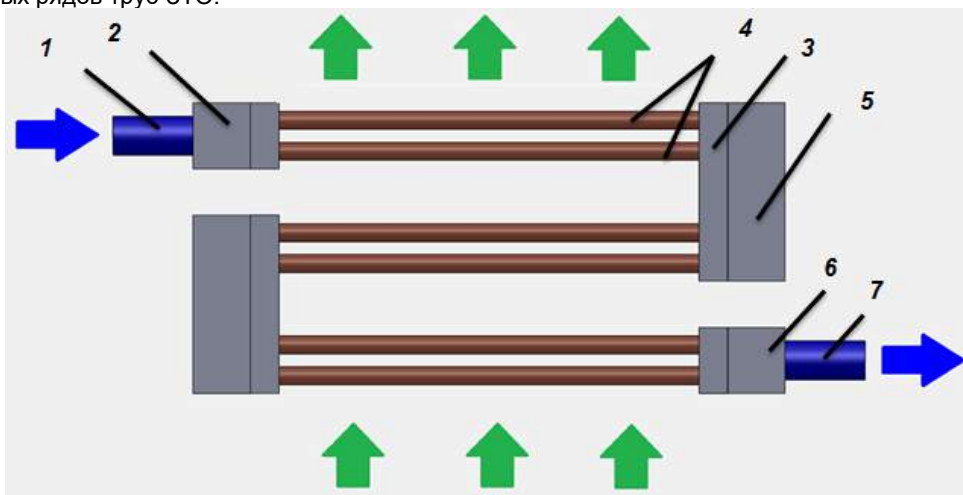


Рис. 1. Теплообменный аппарат с двумя параллельными и шестью общими слоями труб со схемой движения потоков охлаждаемой и охлаждающей сред: 1 – входной патрубок; 2 – входной коллектор в секцию; 3 – трубные решетки; 4 – слои труб в секции; 5 – промежуточный коллектор; 6 – выходной коллектор; 7 – выходной патрубок

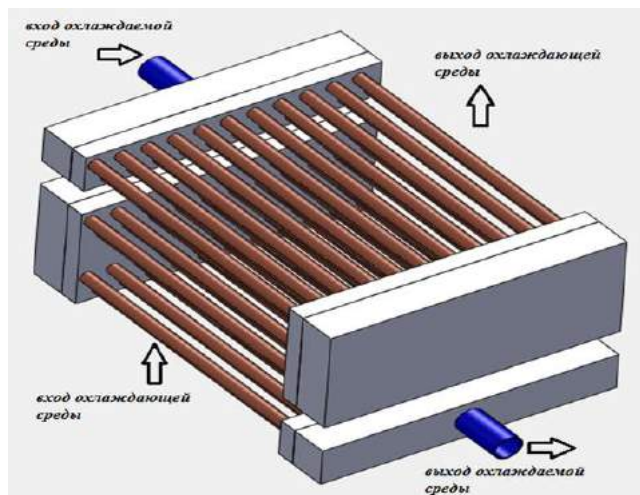


Рис. 2. Изометрический вид теплообменного аппарата с одним параллельным и тремя общими слоями труб

В данном теплообменном аппарате забортная вода движется в межтрубном пространстве. Поперечное обтекание труб, с одной стороны гарантирует более эффективную теплоотдачу, с другой стороны, межтрубное пространство создает небольшое гидравлическое сопротивление, что дает возможность обеспечивать естественную циркуляцию по забортной воде даже при ее небольшом подогреве.

Данный теплообменный аппарат дает возможность менять соотношение габаритов в широких пределах, в связи с тем, что значения его длины  $b$  и ширины  $a$  зависят от количества параллельных рядов и числа общих слоев. Так, при увеличении количества параллельных рядов происходит уменьшение ширины  $a$ , а с возрастанием числа общих слоев наблюдается снижение значения длины  $b$ . На основании этого необходимо провести исследование взаимосвязи габаритов данного теплообменного аппарата.

**2. Порядок проведения исследований**

Для изучения взаимосвязи габаритов была создана математическая модель, алгоритм и программа для ЭВМ для конструктивного расчета забортного теплообменного аппарата.

Вариант со следующими параметрами был взят за базовый:

- мощность 730 кВт;
- температура забортной воды на входе 5°C;
- температура забортной воды на выходе 35°C;
- температура теплоносителя на входе 110°C;
- температура теплоносителя на выходе 80°C;
- высота подъемного канала 0 м;
- трубки 10 × 2;
- расстояние между секциями труб 10 мм;
- давление воды теплоносителя 0,5 МПа;
- гидравлическое сопротивление 100 кПа;
- материал труб – титановый сплав.

Зависимость объема ЗТО от общего числа слоев представлена на рисунке 3.

Расчеты дискретные, поэтому линии между точками проведены для удобства восприятия. Расчеты прекращались, когда ширина  $a$  становилась больше длины  $b$ , т.к. предпочтительным представляется вариант, при котором ширина  $a$  равна длине  $b$ .

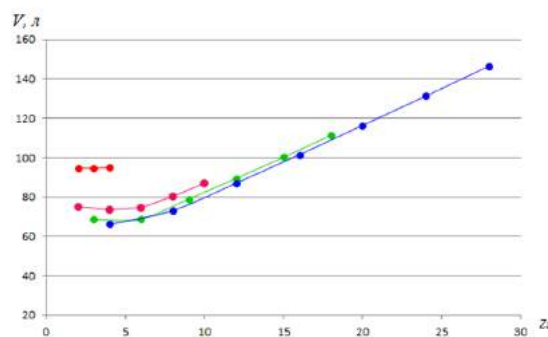


Рис. 3. Зависимость объема ЗТО от общего числа слоев для базового варианта: 1 параллельный слой – красная линия; 2 параллельных слоя – розовая линия; 3 параллельных слоя – зеленая линия; 4 параллельных слоя – синяя линия

Из рисунка 3 видно, что при небольшом общем числе слоев объем остается примерно одинаковым, но при числе слоев больше 8, объем линейно возрастает в зависимости от числа слоев.

Было рассмотрено влияние подъемного канала на объем теплообменного аппарата (рис.4).

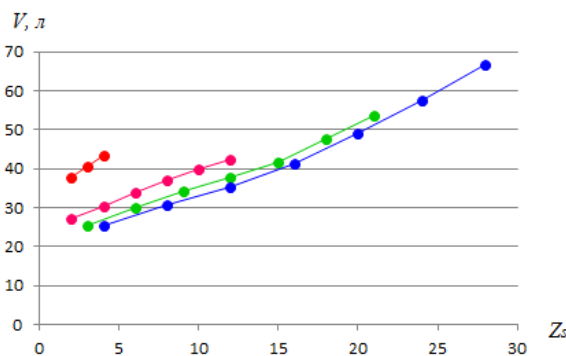


Рис. 4. Зависимость объема ЗТО от общего числа слоев, при высоте подъемного канала равной 0,5 м: 1 параллельный слой – красная линия; 2 параллельных слоя – розовая линия; 3 параллельных слоя – зеленая линия; 4 параллельных слоя – синяя линия

При увеличении высоты подъемного канала до 0,5 м объем ЗТО для всех рассматриваемых

вариантов параллельных слоев уменьшается примерно в два раза в сравнении с базовым вариантом, при этом характер зависимости остается тот же.

В ходе работы так же было рассмотрено влияние на объем ЗТО уменьшения гидравлического сопротивления греющего тракта (рис. 5).

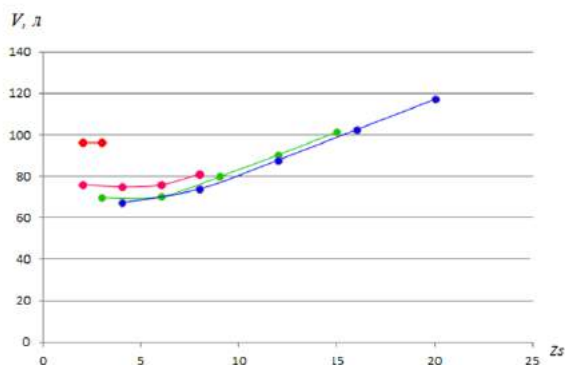


Рис. 5. Зависимость объема ЗТО от общего числа слоев, при гидравлическом сопротивлении греющего тракта равном 50 кПа: 1 параллельный слой – красная линия; 2 параллельных слоя – розовая линия; 3 параллельных слоя – зеленая линия; 4 параллельных слоя – синяя линия

Из сравнения рисунков 3 и 5 видно, что объем ЗТО снижается незначительно, примерно на 15%. При общем числе слоев больше 6 объем линейно возрастает в зависимости от числа слоев.

Из рисунков 3 – 5 видно, что чем больше общее число слоев, тем больше объем квадратного теплообменного аппарата.

На рисунке 6 представлены зависимости габаритов теплообменного аппарата от общего числа слоев труб.

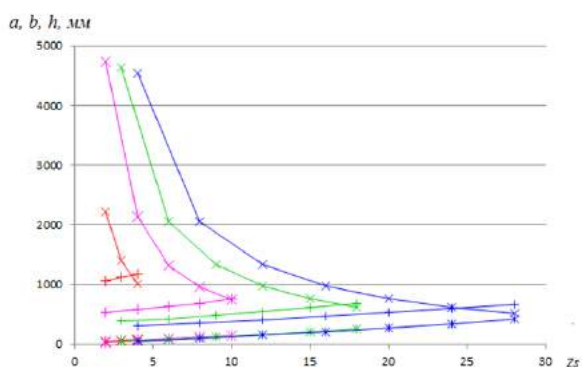


Рис. 6. Зависимость ширины a, длины b, высоты h от общего числа слоев: + – ширина; x – длина; \* – высота. 1 параллельный слой – красная линия; 2 параллельных слоя – розовая линия; 3 параллельных слоя – зеленая линия; 4 параллельных слоя – синяя линия

Из рисунка следует, что с возрастанием общего числа слоев резко падает длина, а ширина ЗТО, напротив, увеличивается. В данном масштабе высота у всех теплообменников складывается в одну линию, поэтому для наглядности она вынесена отдельно (рис. 7).

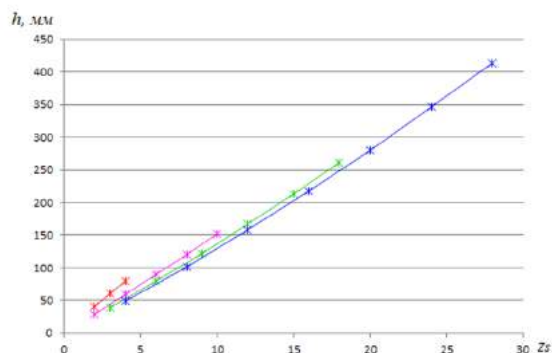


Рис. 7. Зависимость высоты ЗТО от общего числа слоев: 1 параллельный слой – красная линия; 2 параллельных слоя – розовая линия; 3 параллельных слоя – зеленая линия; 4 параллельных слоя – синяя линия

Из рисунка видно, что с увеличением общего числа слоев высота линейно возрастает.

Зависимость объема теплообменного аппарата от отношения ширины a к длине b представлена на рисунке 8.

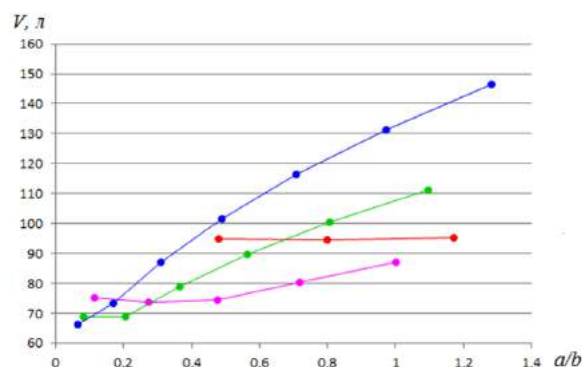


Рис. 8. Зависимость объема ЗТО от отношения ширины к длине: 1 параллельный слой – красная линия; 2 параллельных слоя – розовая линия; 3 параллельных слоя – зеленая линия; 4 параллельных слоя – синяя линия

На рисунке видно, что наилучшими характеристиками обладает теплообменный аппарат с двумя параллельными рядами труб.

Связь между горизонтальным шагом и отношением ширины к длине показана на рисунке 9.

При увеличении горизонтального шага растет значение отношения a/b. Так же, чем большее количество параллельных рядов, тем больше горизонтальный шаг.

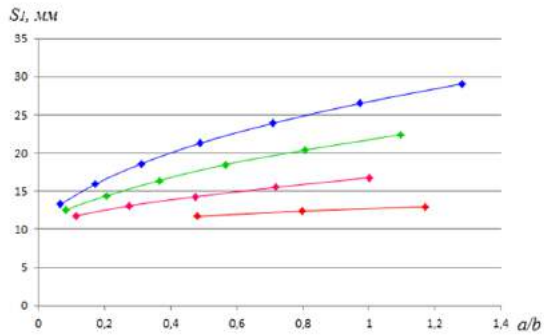


Рис. 9. Зависимость горизонтального шага от отношения ширины к длине ЗТО: 1 параллельный слой – красная линия; 2 параллельных слоя – розовая линия; 3 параллельных слоя – зеленая линия; 4 параллельных слоя – синяя линия

### Заключение

На основании расчетно-теоретического исследования конструктивных параметров ЗТО с горизонтальным расположением труб сделаны следующие выводы.

Данная конструкция ЗТО позволяет менять соотношение габаритов ЗТО в широких пределах.

Наиболее целесообразно использование в ЗТО двух параллельных рядов труб в секции.

Использование большего количества параллельных рядов труб приводит к увеличению объема ЗТО; один параллельный ряд труб не позволяет эффективно менять соотношение габаритов ЗТО.

### Литература

1. Анфимов К.В., Аношкин Ю.И., Андреев В.В., Яшкин А.В., Грибов А.В. Оптимизация схемно-технических решений, связанных с аварийным отводом тепла от реакторной установки // *Фундаментальные исследования*. 2017, № 11-2. С. 261-266.
2. Схемные решения и принципы работы пассивных систем аварийного охлаждения различных типов ЯЭУ: Учебное пособие / А.В. Морозов, О.В. Ремизов, Ю.А. Маслов, В.С. Харитонов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2015. 176 с.
3. Соколов А.Н., Печенкин В.И., Полуничев В.И., Большухин М.А. Система аварийного отвода тепла. Патент РФ на полезную модель № 78600 от 27.11.2008.
4. Большухин М.А., Пахомов А.Н., Соколов А.Н., Хизбуллин А.М. Система аварийного отвода тепла. Патент РФ на полезную модель № 150816 от 27.02.2015.
5. Аполлова А.В., Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Шаманов Н.П. Экспериментальные исследования системы пассивного отвода тепла на Приморской учебно-научной базе СПбГМТУ // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2018, 4(42) Т.1. – С.120-128.
6. Кожемякин В.В., Шаманов Д.Н., Аполлова А.В., Зязин Д.М. Теплообменный аппарат. Патент РФ на полезную модель № 176496 от 27.01.2017.

### References

1. Anfimov K.V., Anoshkin YU.I., Andreev V.V., Yashkin A.V., Gribov A.V. (2017). Optimizatsiya skhemno-tekhnicheskikh reshenij, svyazannykh s avariynym otvodom tepla ot reaktornoj ustanovki. *Fundamental'nye issledovaniya*. 11-2, pp. 261-266.
2. Skhemnye resheniya i printsipy raboty passivnykh sistem avariynogo okhlazhdeniya razlichnykh tipov YAЕHU. *Uchebnoe posobie*. A.V. Morozov, O.V. Remizov, YU.A. Maslov, B.C. Kharitonov. Moscow, NIYAU MIFI, 2015. 176 p.
3. Sokolov A.N., Pechenkin V.I., Polunichev V.I., Bol'shukhin M.A. Sistema avariynogo otvoda tepla. Patent RF na poleznuyu model' 78600 ot 27.11.2008.
4. Bol'shuhin M.A., Pahomov A.N., Sokolov A.N., Hizbullin A.M. Sistema avariynogo otvoda tepla. Patent RF na poleznuyu model' 150816 ot 27.02.2015.
5. Apollova A.V., Kozhemyakin V.V., Shamanov D.N., Shamanov N.P. (2018). Ekhspierimental'nye issledovaniya sistemy passivnogo otvoda tepla na Primorskoj uchebno-nauchnoj baze SPbGMTU. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 4(42) T.1. pp.120-128.
6. Kozhemyakin V.V., SHamanov D.N., Apollova A.V., Zyazin D.M. Teploobmennyy apparat. Patent RF na poleznuyu model' 176496 ot 27.01.2017.

УДК 621.433.3

## АНАЛИЗ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЭУ С ДВУХТОПЛИВНЫМИ МОД ПОСРЕДСТВОМ СИСТЕМ ГЛУБОКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ

**Валерий Викторович Медведев**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

**Игорь Иванович Туркин**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры судовой автоматики и измерений  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: iitg@yandex.ru

**Борис Александрович Тихомиров**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры судовых турбин и турбинных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: b\_tikhomirov@mail.ru

**Роман Олегович Голубев**

студент магистр  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: swit.roma@mail.ru

### Аннотация

В работе выполнен анализ эффективности применения систем глубокой утилизации теплоты (СГУТ) различных типов в составе судовой энергетической установки (СЭУ) с главными двухтопливными малооборотными двигателями внутреннего сгорания (МОД). Приводятся результаты расчётов эффективности регенерации тепловых потерь утилизационными системами различных типов для практического диапазона мощностей, характерных для двухтопливных МОД. Определяются числовые значения параметров рабочих сред в основных элементах СГУТ. Описывается методика корректировки этих параметров при изменении мощности пропульсивной установки. Охарактеризовываются основные подходы к повышению эффективности СГУТ и оценивается их влияние на показатели СЭУ. Проведённые расчёты подтверждают рациональность применения СГУТ совместно с двухтопливными МОД. На СПГ-танкерах такая схема позволяет обеспечить утилизацией теплоты отработавших газов до 80% потребности судна в электроэнергии на эксплуатационном режиме.

**Ключевые слова:** главный двигатель, малооборотный двигатель, система глубокой утилизации теплоты, судовая энергетическая установка, утилизационный газотурбогенератор, утилизационный котёл, утилизационный парогазотурбогенератор, утилизационный паротурбогенератор, судовая электростанция.

## VIABILITY ANALYSIS OF INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF A DUAL-FUEL SLOW-SPEED ENGINE USING A DEEP HEAT RECOVERY SYSTEM

**Valery V. Medvedev**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor,  
Professor, Department of Marine Internal Combustion Engines and Diesel Plants  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

**Igor I. Turkin**

Dr.Sci.Tech, professor  
Professor, Department of Ship Automation and Measurements  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: iitg@yandex.ru

**Boris A. Tikhomirov**

Dr.Sci.Tech, professor

Professor, Department of Ship Turbines and Turbine Plants

St. Petersburg State Marine Technical University

190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3

e-mail: b\_tikhomirov@mail.ru

**Roman O. Golubev**

Master's student

St. Petersburg State Marine Technical University

190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3

e-mail: swit.roma@mail.ru

### Abstract

The paper analyzes the efficiency of application of various types of deep heat recovery systems as part of a ship power plant (SPP) with main dual-fuel slow-speed internal combustion engines. The results of calculations of regeneration efficiency of heat losses by utilizing systems of various types are given for the operating power range, typical for dual-fuel slow-speed engines. The numerical values of the fluid parameters are determined in the main components of the deep heat recovery system. The method for adjusting these parameters when changing power of a propulsion unit is described. The main approaches to improving the effectiveness of the deep heat recovery system are described and their impact on the SPP indicators is assessed. The calculations carried out confirm the rationality of the deep heat recovery system application in combination with dual-fuel slow-speed engines. Aboard LNG tankers, such a scheme provides, by recovery of exhaust gases heat, up to 80% of the ship's demand for electricity in the operating mode.

**Keywords:** main engine, slow-speed engine, system of deep heat recovery, ship power plant, utilization gas turbine generator, recycling boiler, utilization steam and gas turbine generator, utilization steam turbine generator, ship's electric power plant.

### Введение

Интерес к использованию систем глубокой утилизации теплоты (СГУТ) в составе судовых энергетических установок (СЭУ) с дизельными главными двигателями (ГД) известен давно [1] и проявляется достаточно постоянно [2, 3, 4]. Помимо попыток решения, уже «традиционной», задачи повышения степени использования тепла в СЭУ, отметим появление требований к обеспечению нормированного уровня конструктивного коэффициента энергетической эффективности (ККЭЭ – EEDI). Это результат политики Международной морской организации (International maritime organization – IMO), направленной на сокращение выбросов парниковых газов с судов. В результате планомерной работы над решением указанных проблем фирма MAN предлагает ряд решений задачи утилизации тепла в СЭУ с МОД. Сначала они назывались Thermo Efficiency System (TES), затем – Waste Heat Recovery Systems (WHRS) для уменьшения расхода топлива, эмиссии и EEDI. Достигнутые практические результаты, применительно к системе WHRS разной комплектации, и их оценка влияния на величину EEDI выполнены в работе [5]. Однако, возможности повышения энергетической эффективности судов за счет применения СГУТ еще требуют своего изучения [6]. Кроме того, организация рабочего процесса в двухтопливных ГД имеет свои особенности [7], а состав СЭУ с двухтопливными ГД, имеет принципиальные отличия в структуре энергетической системы от СЭУ с дизельными ГД, поэтому вопрос обоснованности использования СГУТ остаётся открытым.

В данной статье рассматривается вопрос рациональности использования СГУТ в составе СЭУ с малооборотными двухтопливными ГД.

### 1. Описание объекта исследования

В данной статье под СГУТ понимается комплекс элементов СЭУ, регенерирующих тепловые потоки, образуемые при работе ГД. На сегодняшний день утилизация тепловых ресурсов посредством утилизационных котлов (УК), генерирующих пар общесудовых параметров, и утилизационных опреснительных установок – достаточно широко распространённая практика. С другой стороны, генерирование электроэнергии за счёт ресурса утилизации применяется лишь в единичных проектах.

Эта тенденция объясняется, с одной стороны, тем, что сам по себе ресурс утилизации, остающийся после получения пара общесудовых параметров, сравнительно невелик и на малотоннажном флоте его реализация нерациональна. С другой стороны, среди крупнотоннажных судов наблюдается тенденция к снижению мощности СЭУ, вследствие необходимости обеспечения соответствия устанавливаемым экологическим ограничениям, что также сокращает ресурс утилизации. По этой причине системы утилизационного генерирования электроэнергии сегодня наиболее распространены на морских контейнеровозах, сохраняющих скорость хода более 25 уз.

С началом освоения двухтопливных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на флоте СПГ-танкеров появилась новая область применения СГУТ. По очевидным причинам именно на судах этого типа двухтопливные двигатели получили наибольшее распространение. Хотя, постепенно в эксплуатацию вводятся и контейнеровозы с двухтопливными МОД, а также, с начала XXI века, в странах Западной Европы широкое распространение получили пассажирские суда с газовыми и двухтопливными ДВС, обеспечивающие внутреннее паромное сообщение. Дальнейшее изложение материала



будет вестись в проекции именно на СПГ-танкеры, что не исключает возможности применения результатов исследования к судам других типов.

В среднем скорость хода больших СПГ-танкеров составляет порядка 19,5 уз, их ГД создают значительный не утилизируемый тепловой поток. ДВС больших стандартных СПГ-танкеров, строившихся в первом десятилетии XXI века были среднеоборотными. Сравнительно малая агрегатная мощность четырёхтактных ДВС и жёсткие ограничения по противодавлению в магистралях отработавших газов (ОГ) препятствовали широкому распространению СГУТ. Однако, в последние годы такая тенденция преодолевается. Например, СПГ-танкер «Великий Новгород», спущенный на воду в 2014 году (головное судно серии из 4-х танкеров), имеет в составе СЭУ утилизационный газотурбогенератор (УГТГ) электрической мощностью 1800 кВт [8].

Появление на рынке двухтопливных малооборотных ДВС создаёт более серьёзный повод к использованию на газовозах утилизационных турбогенераторов – в случае с двухтактными двигателями, это могут быть как паро- так и газотурбогенераторы. Так же корпорацией MAN D&T предлагаются и электрогенераторы, приводимые одновременно паровыми и газовыми турбинами (УПГТГ).

Однозначно за использование СГУТ на СПГ-танкерах с двухтопливными МОД говорит высокая степень чистоты отработавших газов таких двигателей, обеспечиваемая использованием на длительных ходовых режимах топливной смеси, содержащей не более 3-4% запального дизельного топлива. Таким образом, во-первых, обеспечивается менее интенсивное загрязнение утилизационных газовых турбин (ГТ) турбокомпаунда. Во-вторых, появляется возможность более полной утилизации теплоты ОГ в УК, так как можно опустить планку в 165-170°C для температуры ОГ на выходе из УК, примерно, на 50°C. Дальнейшее охлаждение газа в УК нерационально, поскольку, иначе питательной водой не будет эффективно утилизироваться теплота охлаждаемого наддувочного воздуха и контура высокотемпературного водяного охлаждения ГД. В-третьих, СПГ-танкер – это судно со значительной мощностью вспомогательной судовой электростанцией (СЭС). Одна только установка повторного сжижения газа (УПСГ) супер-газовозов имеет мощность порядка 6 МВт, а эксплуатационная мощность СЭС может превышать 10 МВт. Таким образом, утилизационная генерация электроэнергии всегда остаётся востребованной и в случае даже частичного замещения генераторов, приводимых

вспомогательными ДВС, что создаёт значительный прирост энергетической эффективности СЭУ. Схема подобной утилизационной системы приведена на рис.1.

В соответствии с рис.1 ОГ ГД разделяются на два потока. Первый направляется на утилизационную турбину турбонагнетателя (ТН) 2, а второй – на утилизационную ГТ 6.1 в составе УПГТГ 6. Затем потоки вновь объединяются и поступают в УК 5. Располагаемая теплота ОГ используется в УК для получения пара общесудовых параметров (0,7 МПа, 165°C) в секции испарителя 5.2. Часть полученного насыщенного пара (НП) из пароводяного барабана 5.1 поступает к общесудовым потребителям 10. Другая часть НП направляется в пароперегреватель 5.3, где температура пара повышается дополнительно на 50-60°C. Циркуляция пароводяной смеси в УК поддерживается циркуляционным насосом 5.4. Полученный слабopегретый пар направляется на утилизационную паровую турбину (ПТ) 6.2 в составе 6. Утилизационные ПТ и ГТ совместно приводят электрогенератор 6.3. Влажный пар от 6.2 направляется в конденсатор 6.4, где конденсируется при температуре 46°C и давлении 10 кПа. Конденсат направляется конденсатным насосом 7 в тёплый ящик 9, туда же поступает конденсат от 10. Перед поступлением в УК вода дополнительно прокачивается питательным насосом 8 через высокотемпературный водоохладитель 3, где нагревается до 65-75°C, и воздухоохладитель 4 – подогревается до 100°C.

Основной критерий оценки влияния СГУТ на эффективность СЭУ – это изменение её КПД. Он рассчитывается по классической формуле:

$$\eta_{СЭУ} = \frac{3600(N_{ГД} + N_{УПСГ})}{Q_p^n (g_e^{ГД} N_{ГД} + g_e^{ВД} N_{ВД})}, \quad (1)$$

где  $N_{ГД}$ ,  $N_{ВД}$ ,  $N_{УПСГ}$  – соответственно мощности главных вспомогательных двигателей и УПСГ;  $g_e^{ГД}$ ,  $g_e^{ВД}$  – удельные расходы топлива первых двух;  $Q_p^n$  – низшая теплота сгорания используемого топлива. Наличием утилизационных турбин определяется величина  $N_{ВД}$  – чем мощнее утилизационные турбогенераторы, тем меньше на эксплуатационном режиме будет мощность генераторов, приводимых ДВС и тем выше будет  $\eta_{СЭУ}$ .  $N_{УПСГ}$  добавлена в числитель формулы как мощность целевой системы. Весь пар генерируется УК.



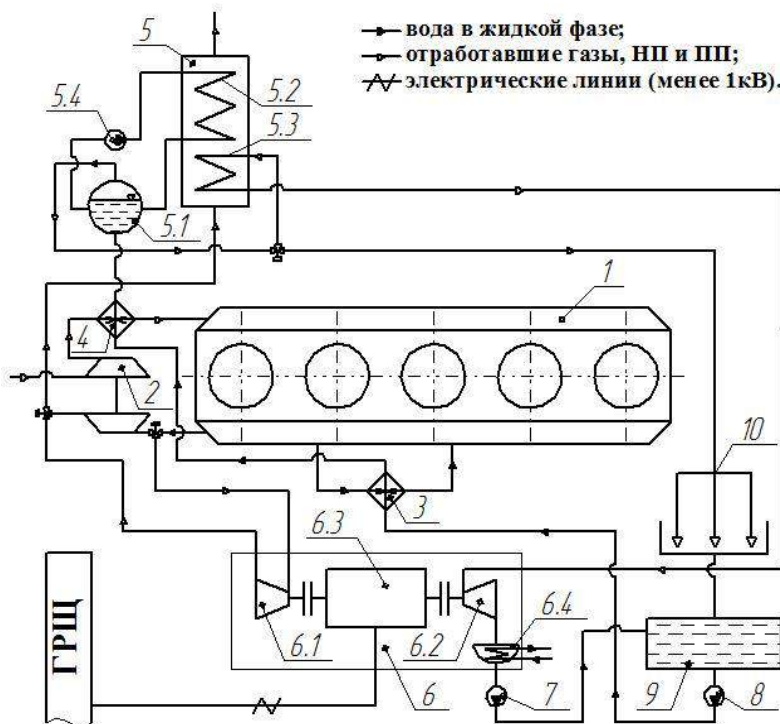


Рис.1. Схема утилизации теплоты отработавших газов МОД

**2. Потенциальная мощность СГУТ**

Величина ресурса утилизации была исследована с помощью системы автоматизированного проектирования, выполняющей расчёт характеристики СЭУ СПГ-танкеров. Описание программного комплекса приведено в [9]. В данной статье представлены лишь результаты обработки расчётных данных и пояснения к ним.

Были рассмотрены СЭУ СПГ-танкеров для диапазона грузоподъемности:  $W = (140 \div 300) \text{ м}^3$  (актуального для СПГ-танкеров с МОД). Некоторые принятые условия расчёта:

- скорость хода 19,5 уз;
- интенсивность испарения груза 0,12% в сутки (от полной грузоподъемности);
- доля парового пространства танков 1,5%;
- пропульсивная установка (ПУ) – двухвальная – в составе СЭУ два МОД;
- в составе СЭУ предусмотрена УПСГ;
- гребные винты – 4-х лопастные с дисковым отношением 0,7;
- ГД фирмы MAN D&T моделей G60ME-C9.5-GI [10] и G70ME-C9.5-GI [11];
- вспомогательные двигатели были выбраны дизельные, с целью упрощения контроля исследуемых характеристик, если ВД – двухтопливные, то изменение типа утилизационных турбин приводит к изменению мощности СЭУ, поскольку изменяется распределение испарений перевозимого газа между двигателями и УПСГ. Характеристики ВД соответствуют двигателю MAN 32/44CR [12] при загрузке в 85%.

Для газозовов из выбранного диапазона определялась мощность ГД на ходовом режиме и механическая мощность СГУТ, которая может быть

получена на рассматриваемом режиме работы ГД (рис.2). Причём, отдельно рассматривались случаи с УГТГ, УПТГ и УПГТГ. В общем случае механическая мощность ГТ и ПТ определяется соответственно по формулам (здесь и далее данные приводятся без учёта потерь в электрогенераторах):

$$N_{ГТГ} = C_{УГТГ} \cdot G_{Г} \cdot c_p^Г \cdot T_{ГТ}^Г \left[ 1 - \left( \frac{P_{ГТ}^Г}{P_{2ГТ}^Г} \right)^{\frac{1-k}{k}} \right] \eta_{oi} \eta_M, \tag{2}$$

$$N_{ПТГ} = G_{ПТ} \cdot c_p^П \cdot T_{ПТ}^П \left[ 1 - \left( \frac{P_{ПТ}^П}{P_{2ПТ}^П} \right)^{\frac{1-k}{k}} \right] \eta_{oi} \eta_M, \tag{3}$$

где  $G_{Г}$  и  $G_{ПТ}$  – расход газа и перегретого пара;  $C_{УГТГ}$  – коэффициент, определяющий долю ОГ перепускаемых через турбину ТН на УГТГ;  $c_p^Г$ ,  $c_p^П$  – осреднённые удельные изобарные теплоёмкости ОГ и пара (соответственно 1,06 кДж/(кг·К) и 2,033 кДж/(кг·К));  $T_{ГТ}$  – температура рабочей среды перед турбиной: для ГТ сверхдлинноходовых малооборотных ДВС она находится в диапазоне 390-410°C, для ПТ – 220-250°C;  $p_{1Т}/p_{2Т}$  – перепад давления в турбине: для ГТ – 3,9, для ПТ – 70;  $k$  – показатель адиабаты: для ГТ – 1,37, для ПТ – 1,294;  $\eta_{oi}$  и  $\eta_M$  – относительный внутренний и механический КПД турбин (соответственно 0,85 и 0,98). Полученные значения в расчётных точках рис.2 усредняются полиномами:

$$\begin{aligned}
 N_{УПТГ} &= -1,06 \cdot 10^{-13} W^3 + 7 \cdot 10^{-8} W^2 - 1,23 \cdot 10^{-2} W + 1341,9, \\
 N_{УТТГ} &= -1,23 \cdot 10^{-13} W^3 + 7,882 \cdot 10^{-8} W^2 - 1,276 \cdot 10^{-2} W + 1561,6, \\
 N_{УПТТГ} &= -1,88 \cdot 10^{-13} W^3 + 1,199 \cdot 10^{-7} W^2 - 1,924 \cdot 10^{-2} W + 2350,4.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

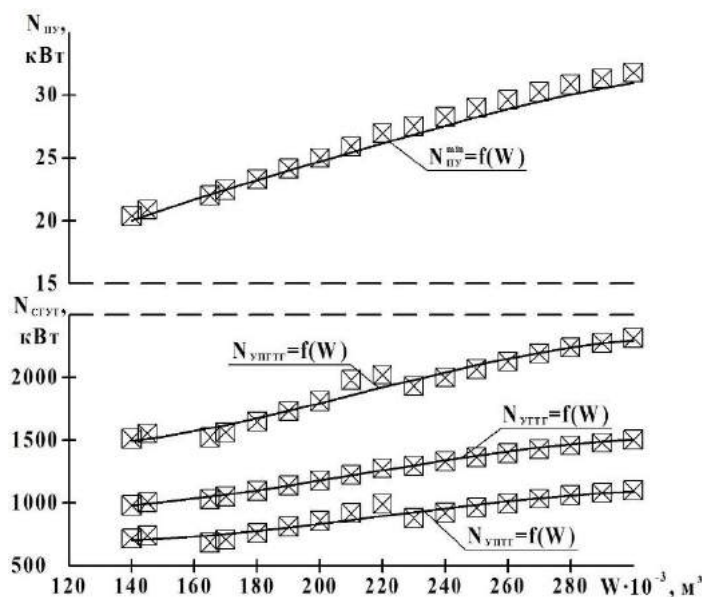


Рис.2. Механическая мощность турбин в составе утилизационных агрегатов

В верхней части рис.2 приведён график  $N_{УПТГ}^{min} = f(W)$  – эффективной мощности ПУ на расчётном режиме, при работе на оптимальный винт. На неё наложены расчётные точки. Они либо принадлежат кривой – частота вращения винта соответствует оптимальной, либо находятся над ней – частота отлична от оптимальной.

**3. Повышение эффективности УГТГ**

Для УГТГ наибольшее отклонение от полинома в расчётном диапазоне составляет 17,5 кВт. Малые

$$G_r = G_r^{МДМ} \bar{N}_1 \left[ 1 + \frac{14 \ln(\bar{N}_1) - 24 \ln(\bar{n})}{100} \right] \left( 1 + \frac{37 \bar{N}_2^3 - 87 \bar{N}_2^2 + 31 \bar{N}_2 + 19}{100} \right) \bar{N}_2,
 \tag{5}$$

$$T_{2T}^r = T_{2T}^{rМДМ} + 15 \ln(\bar{N}_1) + 45 \ln(\bar{n}) + 280 \bar{N}_2^2 - 410 \bar{N}_2 + 130.
 \tag{6}$$

где  $G_r^{МДМ}$  – секундный расход газа на режиме максимальной длительной мощности (МДМ);  $\bar{N}_1$  и  $\bar{N}_2$  – относительные мощности:  $\bar{N}_1 = \frac{N_{СМДМ}}{N_{МДМ}}$ ,  $\bar{N}_2 = \frac{N_{ГД}}{N_{СМДМ}}$ ;  $\bar{n}$  – относительная частота:  $\bar{n} = \frac{n_{СМДМ}}{n_{МДМ}}$

;  $T_{2T}^{rМДМ}$  – температура на режиме МДМ.

В приведённом виде формулы (5) и (6) не учитывают влияние изменения условий окружающей среды. Параметры ОГ определяются по ним при условии отсутствия СГУТ. Т.е. когда весь ОГ срабатывается на турбине ТН. В соответствии с рис.1 часть ОГ отводится на УГТГ, а при использовании УПТГ просто перепускается в УК. В этом случае производительность по ОГ снижается. Например, по

отклонения обеспечиваются зависимостью мощности агрегата лишь от режима работы ГД (рис.3). В зависимости от мощности, развиваемой двигателем на режиме ( $N_{ГД}$ ), и частоты вращения его коленчатого вала ( $n_{ГД}$ ) изменяется расход и температура ОГ. Расчёт расхода отработавших газов МОД MAN B&W осуществляется по формуле (5), температуры газов за турбиной – по формуле (6) [11]:

данным MAN D&T при байпасировании 12% ОГ ГД на СГУТ, производительность по ОГ относительно исходной без СГУТ снижается на 13% [5]. Тогда приблизительное значение температуры газа перед турбиной может быть найдено в следующем порядке:

1. Определяется температура ОГ перед турбиной для ГД без СГУТ:

$$T_{1T}^{r*} = \frac{T_{2T}^r}{1 - \left[ 1 - \left( \frac{P_{1T}}{P_{2T}} \right)^{\frac{1-k}{k}} \right] \eta_{0i}}.
 \tag{7}$$

2. Находится новая температура перед турбиной:

$$T_{1T}^r = \frac{T_{1T}^{r*} - T_B}{0,87} + T_B,
 \tag{8}$$

где  $T_B$  – температура наддувочного воздуха после воздухоохладителя.

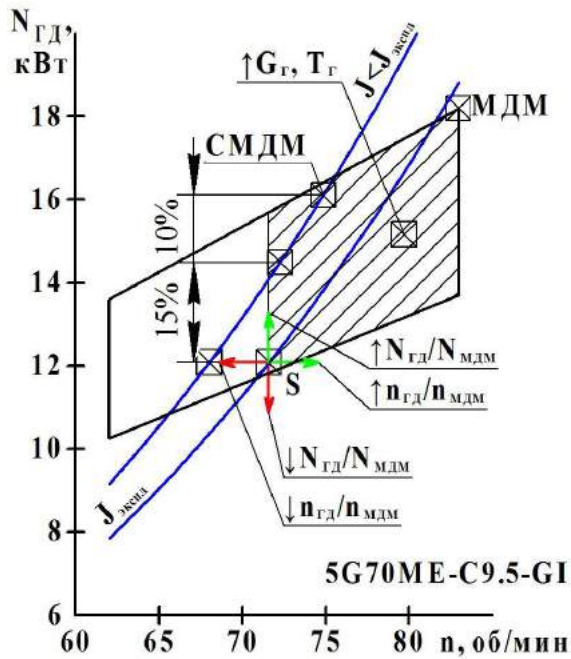


Рис.3. Положение расчётной точки на рабочем поле ГД

В формуле (8) перепад температур при отводе теплоты от ГД принят обратно пропорциональным расходу отводящих её ОГ. Расчёт по формулам (7) и (8) показывает увеличение температуры ОГ на 40-60°C, что соответствует данным, приведённым в [5].

Из формул (5) и (6) однозначно следует, что теплосодержание отработавших газов будет расти при приближении условий работы к режиму МДМ.

Точкой S на рис.3 показан эксплуатационный режим одного из двух ГД газозова (грузовместимостью 170 тыс. м³) с гладким корпусом на тихой воде при ходе в 19,5 уз (проектная точка винта). Выбранный ГД обеспечивает 15% морской запас и 10% запас по двигателю. Перемещение точки S в заштрихованное поле обеспечивает однозначное приращение мощности УГТГ. Для конкретной модели двигателя это возможно при сокращении запаса мощности и соответствующем уменьшении числа цилиндров. В целом же, количество типоразмеров, способных обеспечить 25% запас мощности достаточно ограничено. Поэтому при сокращении запаса становится возможным выбрать другой ГД – с более узким рабочим полем, в котором эксплуатационная точка, в частности, может находиться ближе к МДМ. Также увеличению мощности СГУТ способствуют обрастание корпуса судна и винта и ухудшение погодных условий – утяжеление винтовой характеристики.

#### 4. Повышение эффективности УПТГ

Мощность УПТГ отклоняется от усредняющего полинома (формула (4)) значительно сильнее – до 97 кВт. Это происходит потому что, если мощность УГТГ зависит только от режима работы ГД, то мощность УПТГ зависит от режима работы всей СЭУ, т.к. его рабочая среда – это перегретый пар (ПП), получаемый на ресурсе утилизации, остающемся после генерирования пара, потребного на общесудовые нужды. Располагаемый расход ПП для формулы (3) определяется по формуле:

$$G_{III} = \frac{c_p^I G_f (T_{2T}^I - T_{2УК}^I) \eta_{УК} - G_{III} [c_B (T_{III} - T_1^B) + r_B]}{c_B (T_{III} - T_1^B) + r_B + c_p^II (T_{2T}^I - \Delta T_{УКс.} - T_{III})}, \quad (9)$$

где  $T_{2T}^I$  – температура ОГ на входе в УК, она примерно равна температуре ОГ на выходе из ГТ;  $T_{2УК}^I$  – температура ОГ на выходе из УК;  $\eta_{УК}$  – КПД УК;  $G_{III}$  – секундный расход НП;  $T_{III}$  – его температура;  $T_1^B$  – температура питательной воды, поступающей в УК;  $c_B$  и  $r_B$  – её удельная теплоёмкость и теплота парообразования;  $\Delta T_{УКс.}$  – разность температур между ПП на выходе из УК и ОГ на входе в него (порядка 15 градусов);  $c_p^II$  – осреднённая удельная изобарная теплоёмкость пара нагреваемого от температуры насыщения до температуры на выходе из УК (примерно, 2,303 кДж/(кг·К)). Формулой предполагается, что давления получаемого НП и ПП одинаковы. Система с двумя уровнями давления (с повышением давления ПП до 1МПа) даёт незначительное приращение мощности СГУТ, но увеличивает её себестоимость и усложняет обслуживание. К тому же СЭУ СПГ-танкеров с двумя малооборотными ГД должна включать в свой состав элементы СГУТ, приведённые на рис.1, в удвоенном количестве.

Из сравнения формул (2), (3) и (9) видно, что мощность УГТГ зависит от температуры ОГ линейно, в то время как форма зависимости для УПТГ имеет более сложный вид. Потребность в паре общесудовых параметров в первом приближении может быть определена по формуле:

$$G_{III} = 1,0463W^{0,703}. \quad (10)$$

Эмпирическая зависимость (10) была получена на основе анализа паропроизводительности вспомогательных котлов СПГ-танкеров новейших проектов.

Формулой (9) устанавливаются два основных направления повышения мощности УПТГ. Первое – повышение температуры ОГ на входе в УК. Например, из рис.2 видно, что мощность УПТГ меньше суммы мощностей УПТГ и УГТГ. Потому что при работе ПТ в составе УПТГ, перегретый пар генерируется на ОГ, весь объём которых предварительно срабатывает в ГТ (УГТГ и ТН); а при использовании лишь УПТГ, 12% ОГ просто перепускаются через турбину ТН и поднимают температуру ОГ перед УК. Таким образом удаётся повысить температуру ОГ на 20-25 градусов. До значений в 260-265°C, против 230-240°C. Второй способ повышения мощности УПТГ – это оптимизация расхода пара вспомогательной энергетической установкой и общесудовыми потребителями, с получением значений  $G_{III}$  ниже устанавливаемых формулой (10).

#### 5. Анализ направлений повышения мощности СГУТ

Для анализа направлений повышения эффективности УГТГ и УПТГ, рассмотренных в двух предыдущих разделах, были исследованы варианты комплектации СЭУ газозова грузовой вместимостью 260

тыс. м<sup>3</sup> ГД трёх моделей (рис.4). С целью обеспечения возможности применения двигателей S70ME-GI [13] и S65ME-GI [14] запас мощности ГД был снижен до 15%. Скорость хода была сохранена прежней – 19,5 уз. Для одновременной реализации подходов по повышению мощности генераторов различных типов, рассматривалась СЭУ с УПГТГ.

Мощность СГУТ приведена на рис.4 в относительных единицах – как доля от механической мощности СЭС ( $N_{СГУТ}/N_{СЭС}$ ). Последнюю в [15] рекомендовано в первом приближении для СПГ-танкеров с мощностью ПУ более 10 МВт определять по формуле:

$$N_{СЭС} = 0,025 \sum_{i=1}^n N_{ГД} + 250 + N_{УПГТГ} + N_{КВД/КНД}, \quad (11)$$

где  $N_{КВД/КНД}$  – это мощность топливных компрессоров высокого либо низкого давления, нагнетающих испаряющийся СПГ в цилиндры ГД (для двигателей ME-GI – это исключительно компрессоры высокого давления).

Из рис.4 видно, что наибольшая мощность УПГТГ была обеспечена при оснащении СЭУ ГД S65ME-GI, поскольку на рабочем поле этих ГД эксплуатационную точку удалось расположить ближе всего к точке МДМ. Наименьшую мощность УПГТГ развивает на двигателях G70ME-GI – эксплуатационная точка наиболее удалена от МДМ. На рис.4 результаты расчёта показаны для трёх различных уровней потребления НП. Первые столбики для каждого двигателя определяются потребностью в НП, устанавливаемой формулой (10), два других – результаты сокращения потребности в НП. Видно, что сокращение  $G_{НП}$  во

всех случаях обеспечивает приращение мощности УПГТГ. Увеличение же КПД СЭУ в этом случае – вопрос не однозначный, т.к., скорее всего, сокращение  $G_{НП}$  будет скомпенсировано увеличившейся мощностью электропотребителей.

Необходимо отметить, что достижение наибольшей мощности СГУТ не всегда обеспечивает наивысший КПД СЭУ. Например, ГД G70ME-GI позволяют установить СГУТ наименьшей мощности, но наибольший ход поршней этих двигателей обуславливает их наибольшую экономичность (наибольший  $\eta_{ГД}$ ), сказывающуюся на КПД СЭУ в большей степени. К тому же в этом конкретном случае диапазон частот вращения ГД G70ME-GI подходит наилучшим образом для ПУ, обеспечивая наибольший КПД винта – 0,623 против 0,61 для ГД S65ME-GI. Поэтому, повышая КПД СЭУ, необходимо одновременно контролировать изменение пропульсивного КПД, способное свести на нет результаты оптимизации характеристик СЭУ. К тому же само включение СГУТ в состав СЭУ приводит к снижению экономичности ГД. В первую очередь, из-за снижения избытка воздуха для сгорания топлива при перепуске части ОГ в обход турбин ТН, а также из-за увеличения, в ряде случаев, противодавления в газовыпускном тракте. По данным [5] эти процессы сказываются на увеличении удельного расхода топлива ГД примерно на 1,2%.

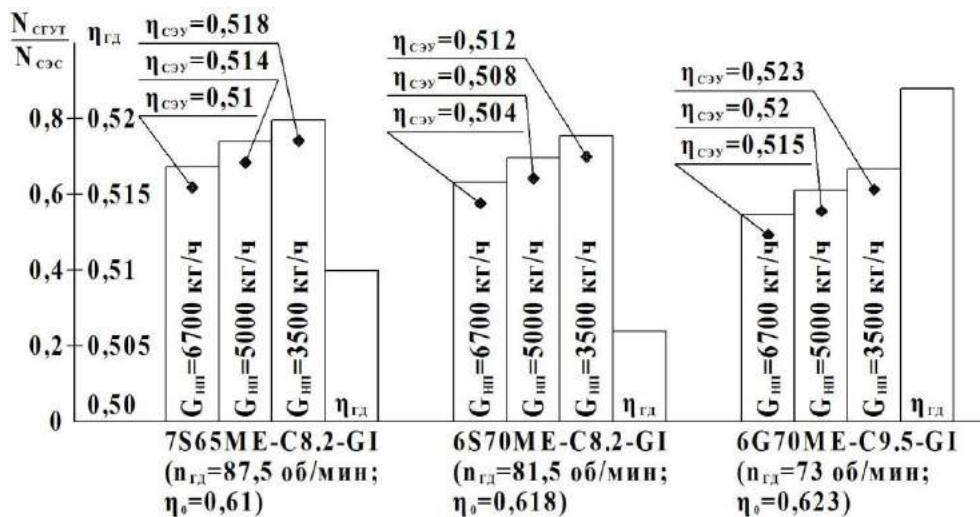


Рис.4. Результаты анализа изменения мощности СГУТ и КПД СЭУ

### Заключение

1. Проведённые расчёты подтверждают рациональность применения СГУТ совместно с двухтопливными МОД по схеме на рис.1. На СПГ-танкерах такая схема позволяет обеспечить утилизацией теплоты ОГ до 80% потребности судна в электроэнергии на эксплуатационном режиме.

2. Было установлено, что, при одинаковой мощности ГД, эффективность применения УПГТГ

выше чем УПТГ, примерно, на 40% (рис.2). Что однозначно говорит за использование именно этого типа СГУТ, особенно в условиях жёстких ограничений по противодавлению в газовыпускном тракте.

3. Была подтверждена наибольшая эффективность СЭУ, включающей в свой состав оба типа турбогенераторов – УПГТГ, а также были описаны причины, по которым мощность

комбинированного генератора будет меньше суммы мощностей УГТГ и УПТГ.

4. Был оценен эффект от замещения потребителей насыщенного пара электрическими на мощность, развиваемую СГУТ. Расчёты подтвердили возможность увеличения таким образом последней на 15% и более

Была продемонстрирована ведущая роль ГД в обеспечении эффективности СЭУ, нерациональный подбор которых способен нивелировать экономический эффект от применения СГУТ.

#### Литература

1. Маслов В.В. Утилизация теплоты судовых дизелей. – М. Транспорт, 1990. – 144 с.
2. Андреев А.А., Самохвалов В.С., Смагин Д.Н., Цвиклис В.С. Современное состояние систем глубокой утилизации вторичных энергоресурсов судовых дизельных энергетических установок // Зб. наук. пр. УДМТУ. – 2002. – № 5 (283). – С. 66-76.
3. Сирота А.А., Радченко А.Н., Коновалов Д.В., Радченко Н.И. Тригенерационные системы комплексного использования сбросной теплоты судовых дизелей // Вестник двигателестроения. – 2008. – № 2. – С. 68-72.
4. Чехранов С.В., Симашов Р.Р., Ханькович И.Н. Развитие теплоутилизационных технологий в судовой энергетике // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. №3 (37) Т.1. – С.107-111.
5. Waste Heat Recovery System (WHRS) for Reduction of Fuel Consumption, Emissions and EEDI. MAN Diesel & Turbo, Augsburg, August 2014. – 32 p.
6. Медведев В.В., Гаврилов В.В., Киселев С.Н. Обзор и анализ возможностей различных способов повышения энергетической эффективности судов // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – №2 (40) Т.1. – С.94-103.
7. Гаврилов В.В., Медведев В.В., Богачёв Д.Д. Совершенствование рабочего процесса судового двухтопливного двигателя // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 4(42). Т.1. – С.155-160.
8. SIGNIFICANT SHIPS of 2014, London, The Royal Institution of Naval Architects, 2015.
9. Голубев Р.О. Система автоматизированного проектирования энергетической установки СПГ-танкера // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов. – 2018. №5 – С.466-470.
10. MAN B&W G60ME-C9.5-GI-TII. Project Guide. MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, October 2017. – 456 p.
11. MAN B&W G70ME-C9.5-GI-TII. Project Guide. MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, October 2017. – 456 p.
12. MAN 32/44CR. Project Guide. MAN Diesel & Turbo, Augsburg, 2018. – 448 p.
13. MAN B&W S70ME-C8.2-GI-TII, Project Guide, MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, February 2014.
14. MAN B&W S65ME-C8.2-GI-TII, Project Guide, MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, February 2014.
15. MARPOL 73/78 ANNEX 5, RESOLUTION MEPC.245(66), Guidelines on the method of calculation of the attained EEDI for new ships, 2014.

#### References

1. Maslov V.V. Utilizatsiya teploty sudovykh dizeley. M. Transport, 1990. – 144 s. (In Russian)
2. Andreev A.A., Samohvalov V.S., Smagin D.N. and Cviklis V.S. "Sovremennoe sostojanie sistem glubokoj utilizacii vtorichnyh jenergoresursov sudovykh dizelnyh jenergeticheskikh ustanovok." Zb. nauk. pr. UDMTU 5(283) (2002): S.66-76. (In Russian)
3. Sirota A.A., Radchenko A.N., Konovalov D.V., Radchenko N.I. Trigeneratsionnyye sistemy kompleksnogo ispol'zovaniya sbrosnoj teploty sudovykh dizeley. Vestnik dvigatelestroyeniya. 2008. N2. S.68-72. (In Russian)
4. Chekhranov S.V., Simashov R.R., Khan'kovich I.N. Razvitiye teploutilizatsionnykh tekhnologiy v sudovoy energetike. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii. 2017. N3 (37) T.1. S.107-111. (In Russian)
5. Waste Heat Recovery System (WHRS) for Reduction of Fuel Consumption, Emissions and EEDI. MAN Diesel & Turbo, 2014. – 32 p.
6. Medvedev V.V., Gavrilo V.V., Kiselev S.N. Obzor i analiz vozmozhnostej razlichny`x sposobov pov`sheniya e`nergeticheskoy e`ffektivnosti sudov. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii, 2018, N 4(42), T1, S.155-160. (In Russian)
7. Gavrilo V.V., Medvedev V.V., Bogachev D.D. Improving the working process of the ship dual-fuel engine // Marine intellectual technologies. - 2018. N4 (42). T.1. - P.155-160. (In Russian)
8. SIGNIFICANT SHIPS of 2014, London, The Royal Institution of Naval Architects, 2015.
9. Golubev R.O. Sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya e`nergeticheskoy ustanovki SPG-tankera. Regional`naya informatika i informacionnaya bezopasnost` . Sbornik trudov, 2018, N5, S.466-470. (In Russian)
10. MAN B&W G60ME-C9.5-GI-TII. Project Guide. MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, October 2017. – 456 p.
11. MAN B&W G70ME-C9.5-GI-TII. Project Guide. MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, October 2017. – 456 p.
12. MAN 32/44CR. Project Guide. MAN Diesel & Turbo, Augsburg, 2018. – 448 p.
13. MAN B&W S70ME-C8.2-GI-TII, Project Guide, MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, February 2014.
14. MAN B&W S65ME-C8.2-GI-TII, Project Guide, MAN Diesel & Turbo, Copenhagen, February 2014.
15. MARPOL 73/78 ANNEX 5, RESOLUTION MEPC.245(66), Guidelines on the method of calculation of the attained EEDI for new ships, 2014.



УДК 621.313.3

## АНАЛИЗ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВАЛОГЕНЕРАТОРОВ В СОСТАВЕ СЭУ СПГ-ТАНКЕРОВ С ГЛАВНЫМИ ДВУХТОПЛИВНЫМИ МОД ПОСРЕДСТВОМ СИСТЕМ ГЛУБОКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ

**Валерий Викторович Медведев**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

**Владимир Анатольевич Жуков**

доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой теории и конструкции судовых двигателей внутреннего сгорания  
Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова  
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: va\_zhukov@rambler.ru

**Игорь Иванович Туркин**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры судовой автоматики и измерений  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: iitg@yandex.ru

**Роман Олегович Голубев**

студент магистр  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: swit.roma@mail.ru

### Аннотация

В работе выполнен анализ эффективности применения валогенераторов (ВГ) в составе энергетических установок СПГ-танкеров с главными двухтопливными малооборотными двигателями внутреннего сгорания (МОД). Использование ВГ для повышения энергетической эффективности в СЭУ с обычными дизельными МОД известно давно. Однако, принципиально новая топливная система и её жёсткая связь с системой удержания груза требуют проведения специального анализа для СПГ-танкеров.

Рассмотрено влияние базовых схем применения ВГ на энергетическую эффективность судовой электростанции. Рассмотрены особенности использования ВГ в составе энергетической установки СПГ-танкера. Определяется мощность, которую они должны генерировать.

Особое внимание уделено различным вариантам параллельной работы ВГ с электрогенераторными агрегатами, использующими в качестве приводов дизельные и двухтопливные вспомогательные двигатели.

Для построения графиков и квалитметрического анализа использовалась специально разработанная система расчётов и инженерного анализа, позволяющая прогнозировать характеристики энергетических установок СПГ-танкеров с различным компонентным составом.

Расчётным путём определены наиболее эффективные условия применения ВГ на СПГ-танкерах. Установлено, что привод ВГ от МОД с высоким давлением нагнетания газа, в условиях параллельной работы с установкой повторного сжижения газа, имеет ряд существенных недостатков, нивелируемых, в ряде случаев, например, отказом от ВГ в пользу двухтопливных электрогенераторных агрегатов.

**Ключевые слова:** валогенератор, двухтопливный дизельный электрогенератор, компрессор высокого давления, малооборотный двухтопливный двигатель, сжиженный природный газ, судовая энергетическая установка, установка повторного сжижения газа.

## ANALYSIS OF THE VIABILITY OF APPLICATION OF SHAFT DRIVEN GENERATORS AS PART OF SPP OF LNG TANKERS WITH MAIN DUAL-FUEL SLOW-SPEED ENGINES

**Valery V. Medvedev**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor,  
Professor, Department of Marine Internal Combustion Engines and Diesel Plants  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

**Vladimir A. Zhukov**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor,  
Head of the Department of Theory and Design of Shipboard Internal Combustion Engines  
State University of Maritime and River Fleet named after adm. S.O. Makarov  
198035, St. Petersburg, Dvinskaya, 5/7  
e-mail: va\_zhukov@rambler.ru

**Igor I. Turkin**

Dr.Sci.Tech, professor  
Professor, Department of Ship Automation and Measurements  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: iitg@yandex.ru

**Roman O. Golubev**

Master's student  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya,3  
e-mail: swit.roma@mail.ru

**Abstract**

The paper analyzes the efficiency of application of various types of shaft driven generators as part of a ship power plant (SPP) of LNG tankers with main dual-fuel slow-speed internal combustion engines. The use of shaft driven generator to increase energy efficiency in an SPP with conventional diesel slow-speed engines has long been known. However, a fundamentally new fuel system and its tight coupling with the cargo holding system require special analysis for LNG tankers.

The influence of the basic schemes of shaft driven generators application on the energy efficiency of the ship power plant is reviewed. The features of the use of shaft driven generator as part of the power plant of a LNG tanker have been reviewed. The power they must generate is determined.

Particular attention is paid to the various options for parallel operation of shaft driven generators with electric generator sets, using diesel and dual-fuel auxiliary engines as drives.

For the construction of graphs and qualimetric analysis, a specially developed system of calculations and engineering analysis was used to predict the characteristics of power plants of LNG tankers with different component composition.

The most effective conditions for using shaft driven generators on LNG tankers have been determined by calculation. It has been established that the shaft driven generator drive from the slow-speed engine with a high gas injection pressure, under conditions of parallel operation with a gas re-liquefaction plant, has a number of significant drawbacks leveled, in some cases, for example, by rejecting the shaft driven generator in favor of dual-fuel electric generator sets.

**Keywords:** shaft generator, dual-fuel diesel generator, high-pressure compressor, low-speed dual-fuel engine, liquefied natural gas, ship power plant, gas re-liquefaction plant.

**Введение**

Применение валогенераторов (ВГ) в составе судовых энергетических установок (СЭУ) с дизельными главными двигателями (ГД) хорошо известно [1]. Генерирование электроэнергии посредством ГД, имеющих большую экономичность и большой ресурс, вполне обосновано. Признано также их положительное влияние на повышение энергетической эффективности судна, что учитывается, например, при расчете конструктивного коэффициента энергетической эффективности (ККЭЭ) [2]. Однако, возможности повышения энергетической эффективности судов за счет применения ВГ еще требуют своего изучения [3]. Кроме того, организация рабочего процесса в двухтопливных ГД имеет свою специфику [4], а состав СЭУ СПГ-танкеров с двухтопливными ГД, имеет принципиальные отличия в структуре энергетической системы от СЭУ танкеров с дизельными ГД, поэтому вопрос обоснованности использования ВГ так и остаётся открытым.

В данной статье рассматривается вопрос рациональности использования ВГ именно в составе СЭУ с малооборотными двухтопливными ГД, т.к. в

составе СЭУ СПГ-танкеров со среднеоборотными двухтопливными ГД последние, как правило, включены в состав единой электроэнергетической системы, что равносильно использованию ВГ для обеспечения общесудовой потребности в электроэнергии.

**1. Варианты интеграции ВГ в состав СЭУ**

Существует несколько вариантов использования ВГ в составе СЭУ с малооборотными двигателями (МОД) – в зависимости от необходимого качества обеспечиваемой ими электроэнергии.

Первый вариант – применение валогенераторов без преобразования частоты. Этот вариант обеспечивает наименьшую стоимость генерируемой электроэнергии. Во-первых, потому что отсутствуют капитальные затраты на преобразователи частоты. Во-вторых, потому что при отсутствии этих преобразователей сокращаются энергетические потери – суммарные энергетические потери не превышают 8%. Однако, электроэнергия, генерируемая таким образом, валогенераторами судов с малооборотными двигателями и гребными винтами фиксированного шага, будет иметь



сравнительно низкое качество (широкий диапазон изменения частоты генерируемого тока). Тем не менее, по данным [5] эксплуатация большинства судовых электропотребителей возможна в диапазоне частот 50-60 Гц, что вполне соответствует изменениям режима работы пропульсивной установки (ПУ) в пределах диапазона эксплуатационных режимов, при скорости хода судна, близкой к расчётной. Таким образом, статические преобразователи частоты могут быть использованы лишь для преобразования параметров электроэнергии, для чувствительных потребителей.

Второй вариант – применение гидромеханической системы стабилизации частоты вращения ротора ВГ. Эта система обеспечивает постоянную частоту генерируемого тока при изменении частоты вращения коленчатого вала ГД в диапазоне от 70 до 105%, мощности ГД – от 34 до 105% от спецификационной номинальной, т.е. для любого длительного режима работы ГД. С другой стороны, уникальность продукта, поставляемого на рынок лишь компанией Renk, входящей в состав корпорации MAN D&T, предопределяет его высокую стоимость. Потери энергии в системе генерирования не превышают 12%.

Третий вариант – применение системы статического преобразования частоты для всего объёма генерируемой электроэнергии. Такая система, основанная на применении полупроводниковых выпрямителей и преобразователей электрического тока, позволяет обеспечить номинальный режим работы ВГ в диапазоне частот вращения коленчатого вала ГД 75-105% и в диапазоне мощностей 40-105%. Значительным преимуществом системы является то, что она обеспечивает работу ВГ при снижении частоты вращения коленчатого вала ГД вплоть до 40% от номинальной – мощность валогенератора в этом случае будет пропорциональна снижению частоты вращения его ротора. Потери энергии в системе не превышают 11% [5].

## **2. Специфика применения ВГ в составе СЭУ СПГ-танкера**

Особенность использования ВГ в составе СЭУ с двухтопливными МОД заключается в необходимости учёта взаимного влияния электроэнергетической системы, системы питания ГД газовым топливом и

системы повторного сжижения невостробованного объёма испаряющегося перевозимого груза. На рис.1 приведена принципиальная схема, отображающая взаимное влияние этих систем.

На всех строящихся сегодня СПГ-танкерах с МОД резервирование мощности ПУ осуществляется побортным расположением ГД (класс резервирования RP3 – Det Norske Veritas [6]), т.е. рассматриваемый объект имеет два главных двигателя (см. рис.1). В нашем случае, помимо гребных винтов, ГД также приводят и валогенераторы. ВГ работают параллельно с электрогенераторами, приводимыми двигателями внутреннего сгорания (ДВС – ВД).

Вся вырабатываемая электроэнергия поступает на главный распределительный щит (ГРЩ). Энергия от ГРЩ поступает к элементам вспомогательной энергетической установки и к общесудовым потребителям. В составе СЭУ СПГ-танкеров имеются высокомошные потребители электроэнергии, работу которых, например, в [7] рекомендуется учитывать дифференцировано (для чего установлены формулы расчёта их мощности в зависимости от перерабатываемых объёмов СПГ).

Речь идёт, в первую очередь, о компрессорах газового топлива, обеспечивающих работу ГД на природном газе (ПГ). В статье рассматривается случай, когда ПУ оснащена МОД с высоким давлением нагнетания газа, поскольку, например, по данным из [8] именно этим типом двухтопливных МОД будет оснащаться большинство СПГ-танкеров новейших проектов. В соответствии с формулами, приведёнными в [7], мощность многоступенчатого поршневого компрессора составляет порядка 5% от агрегатной мощности ГД. Эти компрессоры имеют электропривод (ЭД, ток от ГРЩ).

Во-вторых, учитывается работа электродвигателей компрессоров азота и метана, входящих в состав установки повторного сжижения газа (УПСГ). Схема УПСГ, работающей по обратному циклу Брайтона, приведена условно. Испарившийся в грузовых танках ПГ поступает в топливную систему СЭУ. Часть объёма испарений потребляется МОД, также ПГ может потребляться ВД, если последние – двухтопливные. Невостребованный ПГ поступает в УПСГ, сжижается и направляется обратно в грузовые танки.

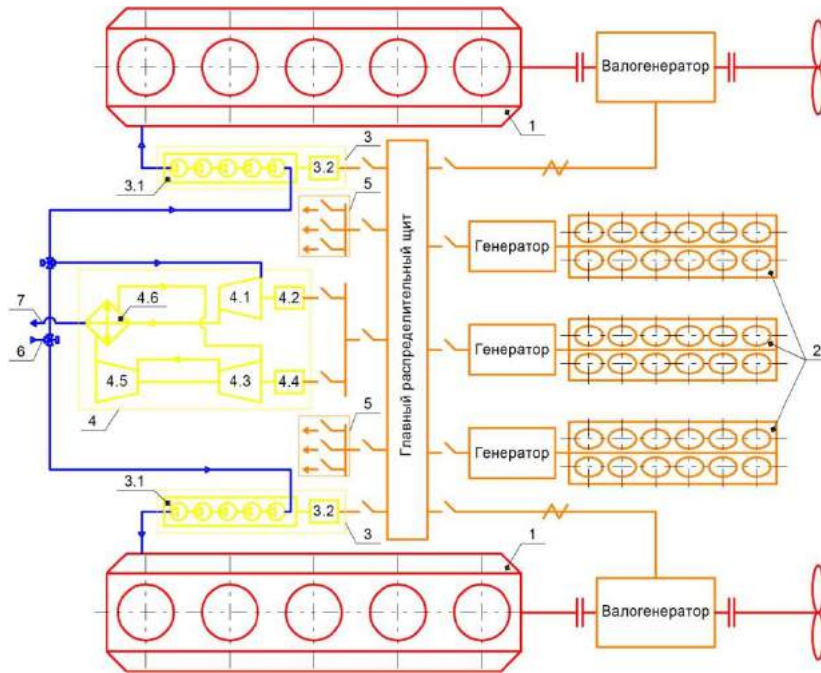


Рис. 1. Принципиальная схема СЭУ СПГ-танкера с двухтопливными МОД и ВГ: 1 – главный двигатель; 2 – вспомогательный двигатель (ДВС) электрогенераторного агрегата; 3 – компрессорный агрегат; 3.1 – многоступенчатый поршневой компрессор; 3.2 – ЭД топливного компрессора; 4 – УПСГ; 4.1 – метановый компрессор; 4.2 – его ЭД; 4.3 – азотный компрессор; 4.4 – его ЭД; 4.5 – турбодетандер; 4.6 – колд бокс; 5 – электроэнергия к элементам ВЭУ и ОСП; 6 – подвод испарений газа из грузовых танков; 7 – возврат сконденсированного газа в танки.

**3. Потребная мощность валогенераторов**

Мощность ВГ определяется мощностью судовой электростанции (СЭС) на эксплуатационном режиме ( $N_{СЭС}$ ), рассчитываемой в первом приближении по формуле [9]:

$$N_{СЭС} = 0,025 \sum N_{ГД} + 250 + N_{квд} + N_{улсг}, \quad (1)$$

где  $N_{ГД}$  – мощность одного (из двух) ГД;  $N_{квд}$  – суммарная мощность компрессоров высокого давления (КВД);  $N_{улсг}$  – мощность УПСГ. Формулы в [9] приведены для механической мощности, что не оказывает значительного влияния на оценку рациональности использования ВГ в составе СЭУ, поскольку, как было показано в первом разделе, системы ВГ различных типов незначительно различаются по потерям при генерировании и преобразовании электроэнергии, к тому же величина самих потерь сильно зависит от режимов работы ГД и ВГ.

Полное обеспечение СПГ-танкера электроэнергией посредством ВГ осложняется наличием УПСГ в составе СЭУ. Номинальная мощность УПСГ на супер-СПГ-танкерах достигает 6-7 МВт, в то время как на основном ходовом режиме она сокращается до 2-4 МВт. Мощность УПСГ зависит от режима работы ГД, от режима работы ВД (двухтопливных), от качества изоляции грузовой системы, от погодных условий и т.д. [10] На рис.2 показано положение эксплуатационных точек на рабочем поле двухтопливного МОД с ВГ.

Рис.2 соответствует режимам работы одного из двух МОД супер-СПГ-танкера грузоподъемностью 260 тыс. м<sup>3</sup>, скорость хода которого на основном эксплуатационном режиме составляет порядка 19,5 уз

уз. На рисунке проектная точка винта (S) вынесена за пределы рабочего поля с целью размещения точек основных эксплуатационных режимов в его пределах. Ход судна в 19,5 уз на тихой воде с гладким корпусом и ВГ, работающими на номинальном режиме, соответствует точке А. При ухудшении погодных условий и обрастании корпуса судна и гребного винта эксплуатация ГД будет происходить в точке В (на рис.2 с задействованием запаса мощности в 15%). Область эксплуатационных режимов в пределах рабочего поля показана штриховкой.

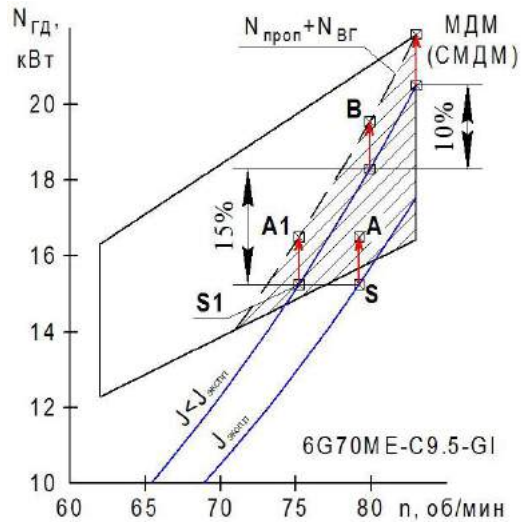


Рис.2. Положение эксплуатационных точек на рабочем поле ГД

Из рис.2 следует, что значительные изменения мощности УПСГ на режимах работы ГД способны выводить эксплуатационные точки за пределы поля длительных эксплуатационных режимов, что сокращает ресурс ГД. Также широкий диапазон эксплуатационных мощностей УПСГ требует от ВГ существенного запаса мощности и приводит к его низкой загрузке большую часть эксплуатационного времени.

Таким образом, рациональность использования ВГ в составе СЭУ СПГ-танкера необходимо рассматривать при их эксплуатации параллельно с ВД. Альтернативой может быть лишь отказ от УПСГ, что практически не осуществимо для СПГ-танкеров грузоподъемностью более 200 тыс. м<sup>3</sup>, ввиду значительных потерь на дожигание неволевого испаряющегося груза.

На рис.3 приведены графики изменения мощности СЭС и генераторных агрегатов в её составе (ВГ и ВД) в зависимости от грузоподъемности СПГ-танкера. В верхней части рисунка также приводится изменение мощности ПУ для рассматриваемого диапазона ( $N_{ПУ} = f(W)$ ). Здесь  $N_{ПУ}$  – это суммарная пропульсивная мощность ГД на режиме. График  $N_{ПУ}^{min} = f(W)$  построен при условии использования оптимальных винтов. Графики были получены расчётом характеристик ряда СПГ-танкеров (показаны точками) в системе автоматизированного проектирования СЭУ, созданной автором статьи [11]. Она обобщает ныне существующие подходы и тенденции в области проектирования судов типа.

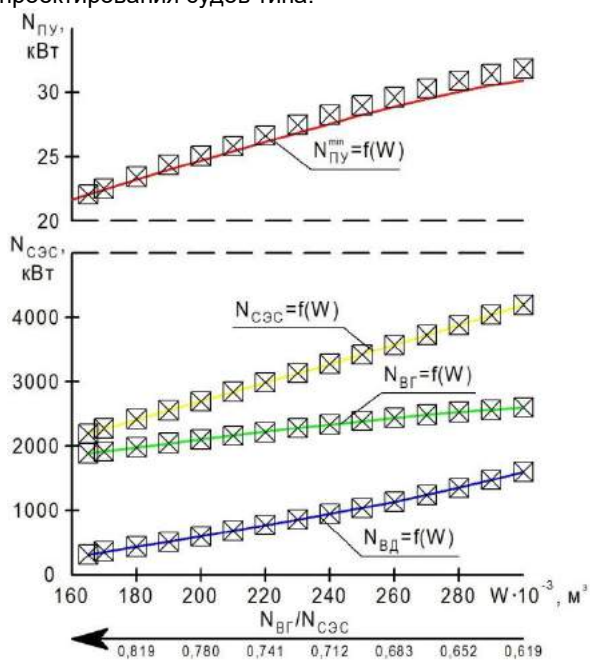


Рис.3. Распределение загрузки между генераторными агрегатами СЭС

Из рис.3 следует, что с ростом грузоподъемности происходит значительное сокращение относительной мощности ВГ ( $N_{ВГ}/N_{СЭС}$ ) – более чем на 20%. Эта тенденция объясняется тем, что увеличение мощности ПУ “не успевает” за увеличением объема испарений перевозимого груза. При этом растёт доля энергопотребления,

приходящаяся на УПСГ, и, как следствие, растёт доля мощности ВД в составе СЭС. Абсолютное же значение суммарной мощности валогенераторов изменяется в диапазоне от 2 до 2,5 МВт. Следует отметить, что кривые на рис.3 были получены для интенсивности испарения груза в 0,12% в сутки от грузоподъемности. В сложных погодных условиях, этот параметр может возрастать до 0,17% и более и требовать значительно большей мощности ВД.

#### 4. Анализ схем комплектации СЭС

Из выше приведённых данных следует, что существует четыре потенциально возможных схемы комплектации СЭС генераторными агрегатами. Это: применение только дизель-генераторов (ДГ), применение ДГ совместно с ВГ, применение только генераторов с двухтопливными ВД и применение двухтопливных электрогенераторных агрегатов совместно с ВГ. В расчётах в качестве ГД рассматривались двигатели MAN B&W G70ME-GI [12], ВД – Wärtsilä 34DF [13] и MAN 32/44CR [14]. Расчёты проводились для СПГ-танкера грузоподъемностью 260 тыс. м<sup>3</sup>, идущего со скоростью 19,5 уз; интенсивность испарения груза была увеличена до 0,15% в сутки.

Было произведено сравнение вариантов по пяти характеристикам, отражающим взаимосвязи энергетического оборудования СЭУ:

1. Мощность СЭС ( $N_{СЭС}$ ) – она изменяется в зависимости от мощности УПСГ и КВД – формула (1). Мощность последних возрастает при применении ВГ, т.е. при увеличении мощности ГД. В целом мощность и УПСГ, и КВД определяется объемами обрабатываемого ими ПГ;

2. Интенсивность грузоперевозки ( $I$ ) – объём груза, условно доставляемый судном в час.  $I$  рассчитывается по формуле:

$$I = \frac{W_{II}}{\frac{S}{v_1} + \frac{S}{v_2} + \frac{t_1 + t_2}{2}}, \quad (2)$$

где  $W_{II}$  – полезная грузоподъемность – объём СПГ, доставляемый танкером за рейс;  $S$  – плечо рейса;  $v_1$  и  $v_2$  – соответственно скорость хода судна вгрузу и вбалласте;  $t_1$  и  $t_2$  – время, проводимое судном в портах экспорта и импорта;

3. Часовое энергопотребление СЭУ ( $Q$ ) – определяется по формуле:

$$Q = 10^{-6} Q_p^{нпт} \left( \sum N_{ГД} g_e^{ГД} + \sum N_{ВД} g_e^{ВД} \right), \quad (3)$$

где  $g_e^{ГД}$  и  $g_e^{ВД}$  – соответственно эквивалентный удельный расход дизельного топлива ГД и ВД;  $N_{ГД}$  и  $N_{ВД}$  – мощности ГД и ВД;  $Q_p^{нпт}$  – низшая теплота сгорания эквивалентного дизельного топлива;

4. Неутилизированный часовой объём СПГ ( $\Delta w$ ) – разница между испарившимся СПГ и потреблённым СЭУ (ДВС в её составе):

$$\Delta w = \frac{0,0015 W}{24} - \left( \sum N_{ГД} g_e^{ГД} k_{ГД} + \sum N_{ВД} g_e^{ВД} k_{ВД} \right) \frac{Q_p^{нпт}}{Q_p^{нпт} \rho}, \quad (4)$$

где  $W$  – геометрический объём грузовых танков судна;  $k_{ГД}$  и  $k_{ВД}$  – соответственно доли ПГ в

составе топливных смесей ГД и ВД;  $Q_p^{ВД}$  и  $Q_p^{ГД}$  – низшая теплота сгорания типов топлива;  $\rho$  – плотность СПГ;

Конструктивный коэффициент энергетической эффективности (ККЭЭ) – используется как критерий

$$ККЭЭ = \frac{[0,75 f_j (\sum N_{ГД}^{СМДМ} - 0,75 \cdot 2 N_{ВГ}) + 0,75^2 \cdot 2 N_{ВГ}] C_{ГД} g_e^{ГД} + (N_{СЭС} - 0,75^2 \cdot 2 N_{ВГ}) C_{ВД} g_e^{ВД}}{f_i v_i DWT}, \quad (5)$$

где  $f_i$  и  $f_j$  – поправки на класс ледовых усилений судна;  $N_{ГД}^{СМДМ}$  – мощность ГД на режиме СМДМ;  $N_{ВГ}$  – номинальная мощность ВГ;  $C_{ГД}$  и  $C_{ВД}$  – соответственно граммы углекислого газа, приходящиеся на один грамм топливных смесей ГД и ВД;  $DWT$  – дедвейт судна. Примеры расчётов ККЭЭ для судов с ВГ приведены в [9].

Анализ энергетической эффективности производился именно по критерию ККЭЭ, т.к., в рассматриваемой задаче, он показал большую чувствительность к изменению состава СЭС, нежели классический КПД СЭУ ( $\eta_{СЭУ}$ ), рассчитываемый по формуле:

$$\eta_{СЭУ} = \frac{3600(\sum N_{ГД} + N_{УПСГ} - 2 N_{ВГ})}{g_e^{ГД} N_{ГД} Q_p^{ГД} + g_e^{ВД} N_{ВД} Q_p^{ВД}}, \quad (6)$$

Значения, получаемые по формуле (6) при различных схемах комплектации СЭС, изменяются в диапазоне 0,486-0,488 (общесудовой пар генерируется на ходу утилизационными котлами).

Результаты расчётов в графической форме приведены на рис.4; DF на рисунке – это двухтопливные ВД.

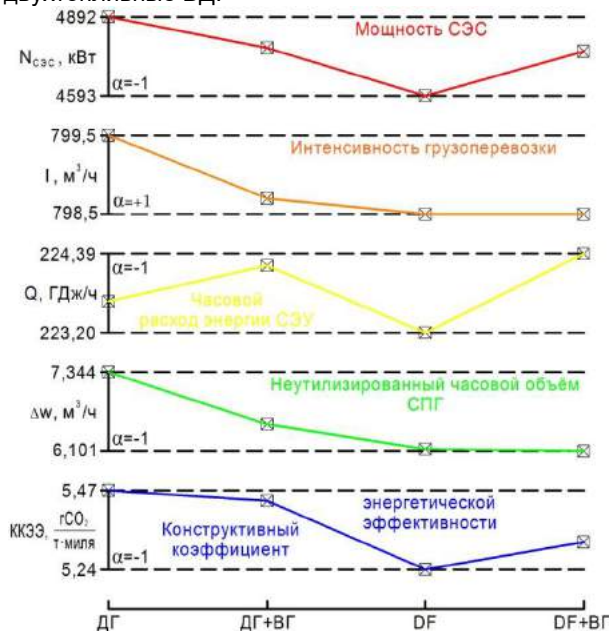


Рис.4. Сравнение СЭУ с различным составом СЭС

По установленным значениям характеристик (частных показателей качества) был рассчитан агрегированный показатель качества каждого варианта. Расчёт производился относительно базового варианта – СЭС, оснащённой ДГ. Значение агрегированного показателя качества определялось по равнопрочной модели (равные весовые

оценки энергетической эффективности проекта судна, во многом зависящей от состава его СЭУ (в т.ч. от состава СЭС). В соответствии с [9] для СЭУ с МОД и ВГ ККЭЭ может быть определён по формуле:

коэффициенты у каждой из пяти характеристик). Характер влияния частных показателей качества на агрегированный определяется коэффициентом  $\alpha$  (положительно/отрицательно), значение которого для каждой из характеристик приведено на рис.4.

Расчёт показал, что при принятых условиях сравнения, вариант, реализующий параллельную работу ДГ с ВГ, превосходит базовый на 3%; DF с ВГ – на 5%; DF (без ВГ) – на 6%. Т.е. наилучшей является комплектация СЭС двухтопливными ВД с отказом от ВГ. В соответствии с рис.4 такая схема комплектации СЭС обеспечит минимальный расход энергии СЭУ. Во-первых, потому что перевод СЭС на ПГ сокращает значение  $\Delta w$  и, как следствие, мощность УПСГ. Во-вторых, не происходит увеличение мощности КВД. Следовательно, низким остаётся значение  $N_{СЭС}$ . Пониженное значение ККЭЭ варианта, среди прочего, обеспечивается тем, что осуществляется максимальный перевод СЭУ на ПГ, с одного грамма которого выделяется меньше углекислого газа, чем с одного грамма ДТ [7].

### Заключение

1. Установлено, что ВГ применимы на больших стандартных (large conventional) СПГ-танкерах ( $W=150-180$  тыс. м³) с дизельными ВД, при нехватке испарений груза для двухтопливных ВД. Также эти СПГ танкеры, как правило, не оснащаются УПСГ, чем исключается параллельная работа валогенераторов с ВД.

2. Квалиметрический анализ схем СЭС показал, что при использовании УПСГ применение ВГ для обеспечения общесудовой потребности в электроэнергии не является наиболее эффективным. Поскольку, снижение удельного расхода топлива СЭС приводит к увеличению мощности, потребной для УПСГ, а при использовании МОД с высоким давлением нагнетания газа дополнительно наблюдается рост энергозатрат на вспомогательную энергетическую установку.

3. Анализ потребности СПГ-танкера с двухтопливными МОД в электроэнергии показал, что мощность ВГ при параллельной работе с ВД не будет превышать 2,5 МВт; с соответствующей агрегатной мощностью ВГ порядка 1,5 МВт.

4. Расчёты показали, что в случаях, когда испаряющегося груза достаточно для работы и ПУ, и СЭС, применение менее экономичных двухтопливных электрогенераторов обеспечивает более высокий показатель качества проекта судна.

При сравнении вариантов комплектации СЭС не учитывалась построечная стоимость. Этот фактор для СПГ-танкеров – судов-транспортников дорогостоящего скоропортящегося груза – принят как второстепенный. Например, стоимость СЭУ

большого стандартного СПГ-танкера, оснащённого МОД с высоким давлением нагнетания газа, составляет порядка 29 млн. долл. США. За один же круговой рейс судно транспортирует СПГ на сумму порядка 32 млн. долл. США [8]. При подобных

соотношениях решения по утилизации, либо повторному сжижению испарений груза, в условиях примерно постоянной стоимости элементов СЭУ, продиктовываются его прогнозируемой рыночной ценой.

### Благодарности

За предоставленную возможность апробирования части материала выражается благодарность оргкомитету конференции «Судостроение молодое» (СПбГМТУ, 18-19 октября 2018 г.). Отдельная благодарность выражается к.т.н. Миронову Михаилу Юрьевичу.

### Литература

1. Григорьев А.В., Петухов В.А. Современные и перспективные судовые валогенераторные установки: монография. – СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С.О.Макарова, 2009. – 176 с.
2. Иванченко А.А., Петров А.П., Живлюк Г.Е. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2015, №3(31). – С.103-112.
3. Медведев В.В., Гаврилов В.В., Киселев С.Н. Обзор и анализ возможностей различных способов повышения энергетической эффективности судов // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. №2 (40) Т.1. – С.94-103.
4. Гаврилов В.В., Медведев В.В., Богачёв Д.Д. Совершенствование рабочего процесса судового двухтопливного двигателя // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. № 2(40). Т.1. – С.78-84.
5. Shaft generators for low speed main engines. MAN Diesel & Turbo, 2015. – 48 p.
6. Rules for classification of ships. Part 6. Chapter 2. Redundant propulsion. Det Norske Veritas, 2012. – 14 p.
7. Annex 5. Resolution MEPC.245(66). 2014 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. – 30 p.
8. 2018 world LNG report. International gas union, 2018. – 106 p.
9. №38 Procedure for calculation and verification of the energy efficiency design index (EEDI). – 81 p.
10. Romero Gomez J., Romero Gomez M., Ferreira Garcia R., De Miguel Catoira A. On board LNG reliquefaction technology: a comparative study. Polish maritime research, 2014. N 81. P.77-88.
11. Голубев Р.О. Система автоматизированного проектирования энергетической установки СПГ-танкера // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов. – 2018. №5 – С.466-470.
12. MAN B&W G70ME-C9.5-GI-TII. Project Guide. MAN Diesel & Turbo, 2017. – 456 p.
13. WÄRTSILÄ 34DF. Product Guide. Wärtsilä, 2017. – 232 p.
14. MAN 32/44CR. Project Guide. MAN Diesel & Turbo, 2018. – 448 p.

### References

1. Grigor'yev A.V., Petukhov V.A. Sovremennyye i perspektivnyye sudovyye valogeneratornyye ustanovki: monografiya. SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S.O.Makarova, 2009. 176 s. (In Russian)
2. Ivanchenko A.A., Petrov A.P., Zhivlyuk G.Ye. Energeticheskaya effektivnost' sudov i regla-mentatsiya vybrosov parnikovyykh gazov. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S.O. Makarova, 2015, N 3(31), S.103-112. (In Russian)
3. Medvedev V.V., Gavrilov V.V., Kiselev S.N. Obzor i analiz vozmozhnostej razlichny'x sposobov povыsheniya e'nergeticheskoy e'ffektivnosti sudov. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii, 2018, N 2(40), T1, S.94-103. (In Russian)
4. Gavrilov V.V., Medvedev V.V., Bogachev D.D. Improving the working process of the ship dual-fuel engine // Marine intellectual technologies. - 2018. № 2 (40). T.1. - P.78-84. (In Russian)
5. Shaft generators for low speed main engines. MAN Diesel & Turbo, 2015. 48 p.
6. Rules for classification of ships. Part 6. Chapter 2. Redundant propulsion. Det Norske Veritas, 2012. 14 p.
7. Annex 5. Resolution MEPC.245(66). 2014 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. 30 p.
8. 2018 world LNG report. International gas union, 2018. 106 p.
9. №38 Procedure for calculation and verification of the energy efficiency design index (EEDI). 81 p.
10. Romero Gomez J., Romero Gomez M., Ferreira Garcia R., De Miguel Catoira A. On board LNG reliquefaction technology: a comparative study. Polish maritime research, 2014. N 81. P.77-88.
11. Golubev R.O. Sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya e'nergeticheskoy ustanovki SPG-tankera. Regional'naya informatika i informacionnaya bezopasnost'. Sbornik trudov, 2018, N 5, S.466-470. (In Russian)
12. MAN B&W G70ME-C9.5-GI-TII. Project Guide. MAN Diesel & Turbo, 2017. 456 p.
13. WÄRTSILÄ 34DF. Product Guide. Wärtsilä, 2017. 232 p.
14. MAN 32/44CR. Project Guide. MAN Diesel & Turbo, 2018. 448 p.



УДК 621.311

## НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СУДОВЫХ ЕДИНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Юрий Александрович Губанов**

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник  
АО «Концерн «Научно-производственное объединение "Аврора" (Санкт-Петербург)  
194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 15  
e-mail: gubanov.electro21@gmail.com

**Игорь Михайлович Калинин**

доктор технических наук, начальник отдела  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»  
196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д.44  
e-mail: i\_kalinin@ksrc.ru

**Александр Сергеевич Корнев**

доктор технических наук, профессор  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: alex\_kornev46@mail.ru

**Виктор Иванович Кузнецов**

кандидат технических наук, начальник управления  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: kuznetsov-spb@bk.ru

**Алексей Петрович Сеньков**

доктор технических наук, профессор  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: senkov@smtu.ru

### Аннотация

В статье выполнен анализ различных вариантов построения единых судовых электроэнергетических систем (СЭЭС), показаны их достоинства и недостатки. Предложены новые структуры СЭЭС с использованием многофазных генераторов и многоуровневых инверторов напряжения. Разработанные структуры СЭЭС позволяют снизить массу, габариты и стоимость комплекта электрооборудования, расходы при эксплуатации судна. Повышение качественных показателей СЭЭС достигается за счет исключения из состава СЭЭС пропульсивных трансформаторов и повышения качества напряжения питания гребных электродвигателей. Проведено компьютерное моделирование части СЭЭС в пакете «Matlab Simulink». Результаты моделирования доказали целесообразность применения в СЭЭС трехуровневых автономных инверторов напряжения, вместо стандартных двухуровневых. Применение трехуровневых инверторов напряжения для питания гребных электродвигателей, позволяет значительно снизить искажения тока в обмотках гребных электродвигателей, что обеспечит более высокие КПД и срок службы электродвигателей.

**Ключевые слова** единая судовая электроэнергетическая система, 12-пульсный выпрямитель, многоуровневый инвертор напряжения, гребная электрическая установка, пропульсивный трансформатор.

## TRENDS FOR IMPROVEMENT OF SHIP INTEGRAL ELECTRIC POWER SYSTEMS

**Yuri A. Gubanov**

Dr.Sci.Tech, Professor, Chief Researcher  
Scientific Production Association JSC "Aurora" (St. Petersburg) 194021, St. Petersburg, st. Karbysheva, 15  
e-mail: gubanov.electro21@gmail.com

**Igor M. Kalinin**

Dr.Sci.Tech, Professor, Head of the Department  
FSUE "Krylov State Research Center"  
196158, St. Petersburg, Moskovskoye shosse, 44  
e-mail: i\_kalinin@ksrc.ru

**Alexander S. Kornev**

Dr.Sci.Tech, professor

St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: alex\_kornev46@mail.ru

**Viktor I. Kuznetsov**

PhD in Engineering Science, head of department  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: kuznetsov-spb@bk.ru

**Alexey P. Senkov**

Dr.Sci.Tech, professor  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: senkov@smtu.ru

**Abstract**

The article analyzes the various options for the construction of integral ship electric power systems (SEPS), showing their advantages and disadvantages. New structures of SEPS with multiphase generators and multilevel voltage inverters are proposed. The developed structures of SEPS allow reducing the weight, dimensions and cost of a set of electrical equipment, the costs of operating the vessel. Improvement of the quality indicators of the SEPS is achieved by eliminating propulsion transformers from the composition of the SEPS and improving the quality of voltage supply to the electric propulsion motors. A computer simulation of the SEPS part was performed in the package "Matlab Simulink". The simulation results proved the expediency of using three-level autonomous voltage inverters in the SEPS, instead of standard two-level ones. The use of three-level voltage inverters to power the electric propulsion motors, can significantly reduce current distortions in the windings of the electric propulsion motors, which will provide higher efficiency and service life of the motors.

**Keywords:** ship integral electric power system, 12-pulse rectifier, multilevel voltage inverter, electric propulsion plant, propulsive transformer

**Введение**

В последние десятилетия системы электродвижения (СЭД) переменного тока нашли применение на судах практически всех видов. В странах НАТО построены надводные корабли с электродвижением, включая авианосцы. Основное преимущество, которое дают судам и кораблям СЭД - высокая степень резервирования и, следовательно, высокая надежность движительной установки. В СЭД возможно резервирование всех компонентов: генераторных агрегатов судовой электростанции, полупроводниковых преобразователей частоты и гребных электродвигателей. Кроме того, СЭД позволяют сократить объем машинного отделения и снижает шумы и вибрации движительной установки. Недостаток СЭД – более высокая стоимость по сравнению с движительными установками на тепловых двигателях.

Питание СЭД и общесудовых потребителей осуществляется от единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС), при этом СЭД потребляет большую часть мощности судовой электростанции. В составе СЭД используются преобразователи частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока, которые являются нелинейной нагрузкой большой мощности и могут создавать значительные искажения напряжения судовой сети. Проблема электромагнитной совместимости общесудовых потребителей и СЭД в ЕЭЭС решается за счет рационального выбора структуры ЕЭЭС и СЭД. Варианты структур ЕЭЭС, которые могут быть использованы на судах, достаточно разнообразны.

**1. Структура ЕЭЭС фирмы «Siemens AG»**

Широко применяется структура ЕЭЭС, разработанная специалистами фирмы Сименс [1] (рисунок 1).

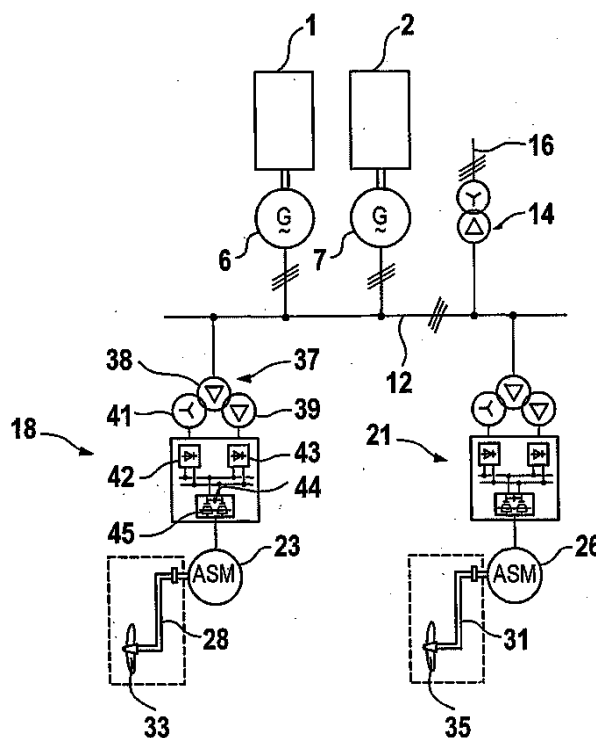


Рис. 1. Схема ЕЭЭС фирмы «Siemens»

В этой структуре ЕЭЭС на входе ПЧ используются согласующие трансформаторы (поз. 37) с двумя трехфазными вторичными обмотки, у одной из которых фазы соединены звездой (поз. 41), а у другой – треугольником (поз. 39). Выходные напряжения вторичных обмоток, смещенные на тридцать электрических градусов, подключены к трехфазным выпрямителям (поз. 42 и 43) ПЧ. Выпрямители потребляют от вторичных обмоток трансформатора нелинейные токи, в которых



существенную долю имеют пятая и седьмая гармоники. Сдвиг между пятыми гармониками одноименных фазных токов вторичных обмоток составляет 150°, а между седьмыми 210°, в результате пятые и седьмые гармоники в значительной степени компенсируются, и в первичной обмотке согласующих трансформаторов ток будет близок к синусоидальному. Поэтому выпрямители не могут создать недопустимых искажений напряжения судовой сети. Согласующие трансформаторы в схеме фирмы Сименс выполняют роль фильтра, подавляя высшие гармоники токов. Кроме того, трансформаторы позволяют получить на выходе выпрямителей ПЧ выпрямленное двенадцатипульсное напряжение, и обеспечить хорошее качество напряжения питания гребных электродвигателей.

Структура ЕЭЭС фирмы Сименс широко применяется и на судах Российского флота – на гидрографическом судне «Вайгач», спасателях типа «Игорь Белоусов», танкерах «Михаил Ульянов», «Кирилл Лавров» и ледоколе проекта 22220. Однако ЕЭЭС фирмы Сименс имеет и определенный недостаток – электромагнитная совместимость общесудовых потребителей и СЭД обеспечивается за счет включения в состав СЭД согласующих трансформаторов большой мощности. Например, на ледоколе 22220 используется 12 согласующих трансформаторов, каждый из которых имеет мощность 6 МВА и массу 12,5 тонн. Применение трансформаторов приводит к повышению стоимости электрооборудования судна и электромонтажных работ при строительстве, к снижению КПД СЭД.

**2. ЕЭЭС LLC фирмы Вяртсила**

Аналогичных результатов по электромагнитной совместимости общесудовых потребителей и СЭД, как и в структуре ЕЭЭС фирмы Сименс, можно достигнуть, если найти способ получения двух трехфазных напряжений, смещенных на тридцать электрических градусов, при этом исключив согласующие трансформаторы из состава СЭД. Фирма Вяртсила Норвей АС разработала структуру ЕЭЭС (рисунок 2), которую назвала концепцией низких потерь (Low Loss Concept - LLC) [2].

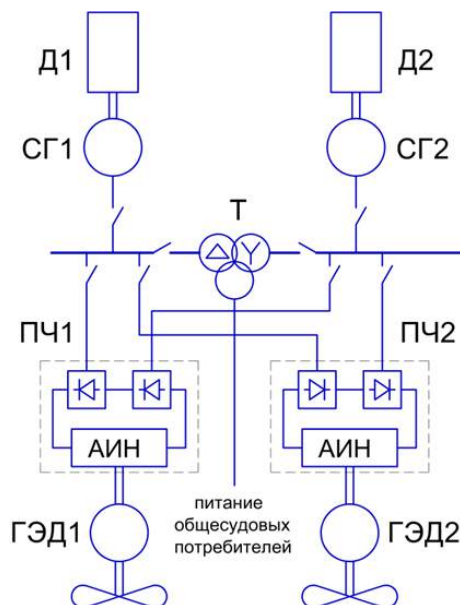


Рис. 2. ЕЭЭС LLC фирмы Вяртсила

В ЕЭЭС фирмы Вяртсила генераторные агрегаты судовой электростанции разделены на две группы СГ1 и СГ2, и каждая группа генераторов подключена к отдельным трехфазным линиям ГРЩ. Синхронизируются две группы генераторов с помощью трансформатора Т. Линии ГРЩ подключены к двум первичным обмоткам трансформатора Т, одна из которых соединена «звездой», а другая «треугольником». В результате при синхронизации напряжения двух групп генераторов будут смещены по фазе на 30 электрических градусов. От линий ГРЩ получают питание выпрямители ПЧ, а общесудовые потребители получают питание от вторичной обмотки трансформатора Т. В структуре ЕЭЭС LLC качество напряжения питания общесудовых потребителей и гребных электродвигателей примерно такое же, как и в ЕЭЭС фирмы Сименс, но согласующие трансформаторы из состава СЭД исключены. По заключению фирмы Вяртсила ЕЭЭС LLC позволяет снизить расход топлива на 9%, кроме того, снижаются габариты, масса и общая стоимость электрооборудования, объем электромонтажных работ при постройке судна, освобождается определенный объем судовых помещений. Однако следует отметить, что в структуре ЕЭЭС LLC появился синхронизирующий трансформатор, а также то, что синхронизация генераторных агрегатов через промежуточный трансформатор не надежна.

**3. ЕЭЭС по патенту РФ №2436708**

Другой способ получения двух систем трехфазных напряжений со сдвигом на тридцать электрических градусов предложен в [3] (рисунок 3).

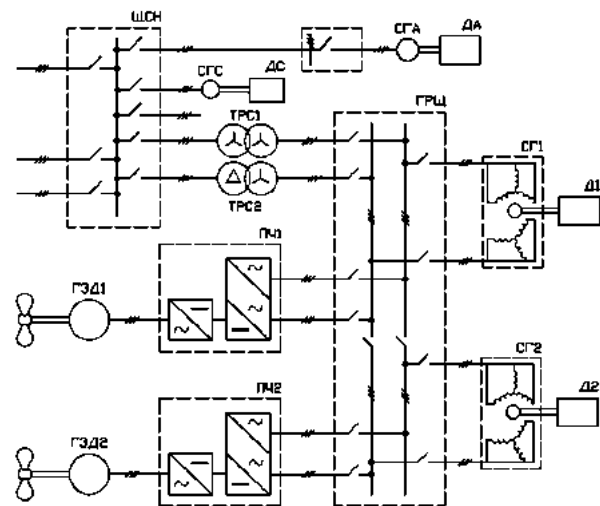


Рис. 3. ЕЭЭС по патенту РФ №2436708

На статорах каждого генератора СГ1 и СГ2, размещены две гальванически не связанные, аналогичные трехфазные обмотки, одноименные напряжения на которых смещены по фазе на 30 электрических градусов. Сдвиг напряжений обеспечивается конструкцией машин, и измениться не может. В составе ГРЩ две трехфазные линии, к которым подключаются обмотки генераторов. Синхронизация двух генераторов при подключении к

общим линиям ГРЩ может осуществляться по напряжениям одной пары трехфазных обмоток, поскольку напряжения на другой паре обмоток будут также синхронизированы. К линиям ГРЩ подключаются двенадцатипульсные выпрямители ПЧ, а для питания общесудовых потребителей сдвиг по фазе напряжений на линиях ГРЩ устраняется с помощью трансформаторов с различной схемой соединения первичных или вторичных обмоток. Эта схема ЕЭЭС позволяет обеспечить такие же достоинства [4], как и ЕЭЭС LLC, однако синхронизация генераторов здесь обеспечивается более надежным способом – параллельным подключением обмоток статора к линиям ГРЩ без промежуточных элементов.

**4. ЕЭЭС с активным выпрямителем**

Одним из направлений по совершенствованию ЕЭЭС, является применение в составе ПЧ активного выпрямителя (АВ) [5], который подключается к трехфазной судовой сети, и обеспечивает питанием трехфазный автономный инвертор (АИН) с ГЭД. Схема силовой части ПЧ, состоящего из АВ и АИН, представлена на рисунке 4.

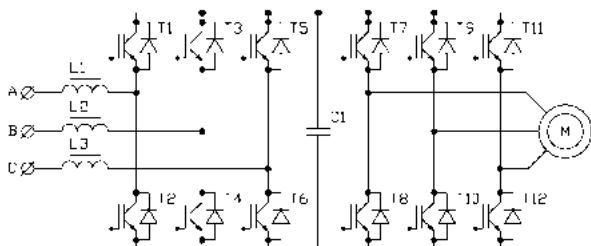


Рис. 4. Схема силовой части ПЧ с активным выпрямителем

Схемы силовой части АВ, состоящей из IGBT-транзисторов Т1-Т6, и силовой части АИН, состоящей из транзисторов Т7-Т12, аналогичны и могут быть построены на одной элементной базе. Выход АВ и вход АИН объединяются звеном постоянного тока с конденсатором фильтра С1. На входе АВ, устанавливаются дроссели L1-L3, позволяющие регулировать постоянное напряжение на выходе АВ. Основными достоинствами ПЧ, состоящего из АВ с АИН, являются:

- форма тока, потребляемого ПЧ от сети, близка к синусоиде, поэтому ПЧ не создает существенных искажений напряжения судовой сети;
- коэффициент мощности ПЧ с ГЭД близок к единице;
- ПЧ дает возможность передачи электрической мощности в обоих направлениях;
- низкие массы и габариты.

Наряду с достоинствами ПЧ с АВ имеет и существенные недостатки:

- высокая стоимость и более низкая надежность по сравнению с ПЧ с неуправляемым выпрямителем, так как количество транзисторов увеличивается в два раза;
- отсутствует гальваническая развязка СЭД и электростанции судна;
- отсутствует возможность применения в составе ПЧ многоуровневых АИН, например, трехуровневых, для которых требуется два источника постоянного тока;

Высокая стоимость и сложность являются основными факторами, негативно влияющими, на внедрение ПЧ с АВ и АИН на судах.

**5. ЕЭЭС с многофазными СГ**

Другим направлением совершенствования ЕЭЭС, является применение в качестве главных генераторов – многофазных синхронных генераторов [6], на статоре которых размещены две и более гальванически развязанных трехфазных обмоток, одноименные напряжения которых могут быть сдвинуты на определенный угол. На рисунке 5 представлена ЕЭЭС с синхронными генераторами, на статоре которых размещены четыре гальванически развязанные трехфазные обмотки.

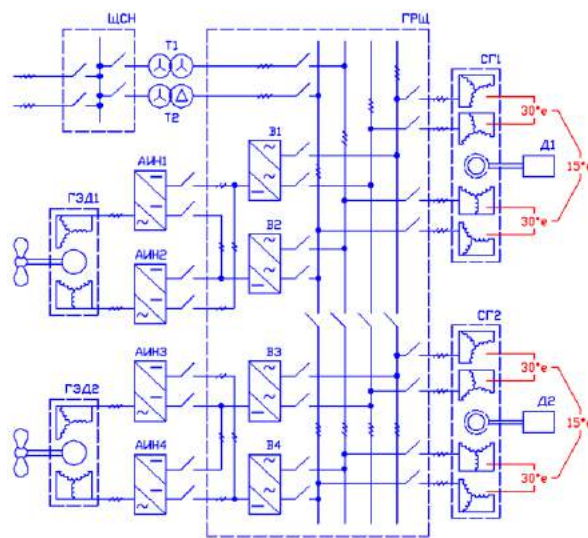


Рис. 5. ЕЭЭС с многофазными СГ

Как видно из рисунка, обмотки разделены на две пары. В каждой паре одноименные напряжения на обмотках, сдвинуты друг относительно друга на 30 электрических градусов. Напряжения между парами обмоток сдвинуты на 15 электрических градусов. В ГРЩ располагаются четыре развязанные трехфазные линии. К каждой линии подключаются обмотки многофазного генератора. Число линий в ГРЩ совпадает с числом обмоток на статоре генератора. В ГРЩ также расположены два 12-пульсных выпрямителя, подключенные к линиям, напряжения на которых сдвинуты друг относительно друга на 30 электрических градусов. Конструктивно выпрямители располагаются в ГРЩ, и передача энергии от выпрямителей к трехуровневым АИН осуществляется на постоянном токе. Выходы двух трехуровневых инверторов напряжения подключаются к двум трехфазным обмоткам ГЭД. Применение многофазных генераторов в ЕЭЭС с гальванически не связанными обмотками статора дает возможность использовать в составе ПЧ 12-пульсные выпрямители и трехуровневые инверторы. Это позволяет повысить КПД и снизить шумы и вибрации СЭД, а также снизить искажения напряжения судовой сети, создаваемые ПЧ. Следует отметить также, что снижаются токи короткого замыкания обмоток статора генераторов и требования к максимальным токам автоматических выключателей переменного тока. Электроэнергия к АИН, питающим ГЭД, от выпрямителей поступает через автоматические

выключатели постоянного тока, коммутационные возможности которых значительно ниже, чем у выключателей переменного тока. Однако электрическая мощность на каждый ГЭД поступает параллельно через четыре выключателя постоянного тока, поэтому требования по коммутируемым постоянным токам будут для выключателей приемлемыми.

Остальные судовые потребители получают питание от щита собственных нужд (ЩСН), который получает питание от вторичных обмоток двух трансформаторов, первичные обмотки которых, имеют разные схемы соединения, и подключаются к любой паре линий в ГРЩ, имеющих сдвиг фаз в 30 электрических градусов.

Основными достоинствами ЕЭЭС с многофазным генератором являются:

- хорошее обеспечение электромагнитной совместимости;
- значительное снижение требований по максимальным коммутируемым токам к коммутационно-защитным аппаратам;
- возможность построения СЭД большой мощности.

### 6. Компьютерное моделирование ЕЭЭС

Одним из направлений совершенствования ЕЭЭС, по рисунку 5, является применение трехуровневых АИН для питания ГЭД. Как было указано выше, для работы трехуровневого АИН требуется два гальванически развязанных источника постоянного тока. Необходимость в двух источниках, ведет к усложнению схемы ЕЭЭС, вследствие чего, возникают вопросы о целесообразности применения трехуровневых АИН в составе ПЧ СЭД.

Для оценки влияния трехуровневого АИН на работу ГЭД проводится компьютерное моделирование в пакете «Matlab Simulink». На рисунке 6 представлена структурная схема модели СЭД с двухуровневым АИН. Модель по рисунку 6 состоит из следующих блоков: источника постоянного тока напряжением 1500 В (G1), двухуровневого АИН (U1), асинхронного ГЭД (M1) мощность 550 кВт, с линейным напряжением 960 В, частотой 50 Гц и нагрузкой на валу.

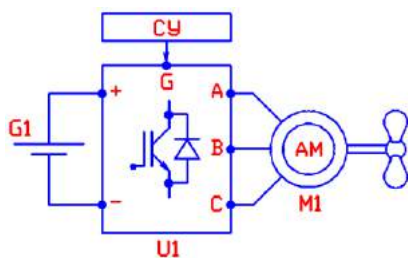


Рис. 6. Структурная схема модели СЭД с двухуровневым АИН

На рисунке 7 представлена структурная схема модели СЭД с трехуровневым АИН. Модель по рисунку 7 состоит из следующих блоков: источников постоянного тока напряжением 750 В (G2, G3), трехуровневого АИН (U2), асинхронного ГЭД (M2) и нагрузкой на валу, аналогично предыдущей модели.

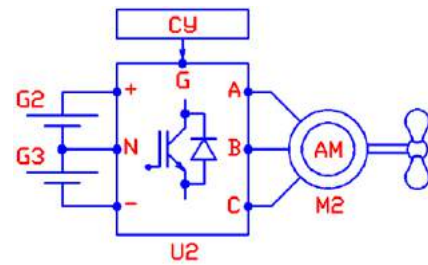


Рис. 7. Структурная схема модели СЭД с трехуровневым АИН

Применение в составе моделей, в качестве источников постоянного тока – идеальных гальванических элементов, позволяет исключить влияние сети на качество тока в обмотках ГЭД, что позволяет с большей степенью достоверности оценить эффект от применения трехуровневого АИН. В моделях производится частотный пуск ГЭД до номинальных параметров. Частота коммутации IGBT транзисторов в двухуровневом и трехуровневом АИН равна, и составляет 2000 Гц.

На рисунке 8 изображены график линейного напряжения  $U_{ab}$  (синий) и фазный ток  $I_a$  (красный) на ГЭД, который запитывается от двухуровневого АИН.

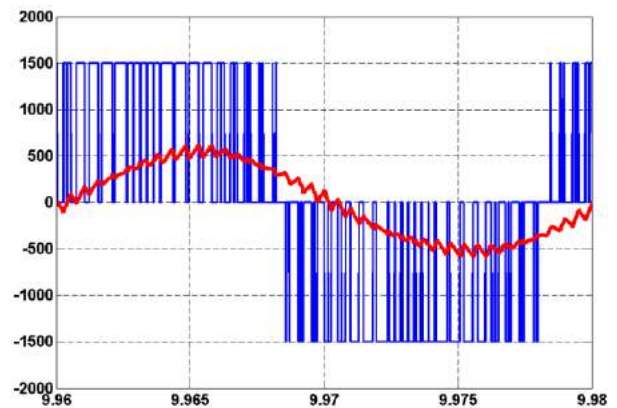


Рис. 8. Линейное напряжение  $U_{ab}$  и фазный ток  $I_a$  ГЭД запитываемого от двухуровневого АИН

На рисунке 9 изображены график линейного напряжения  $U_{ab}$  (синий) и фазный ток  $I_a$  (красный) на ГЭД, который запитывается от трехуровневого АИН.

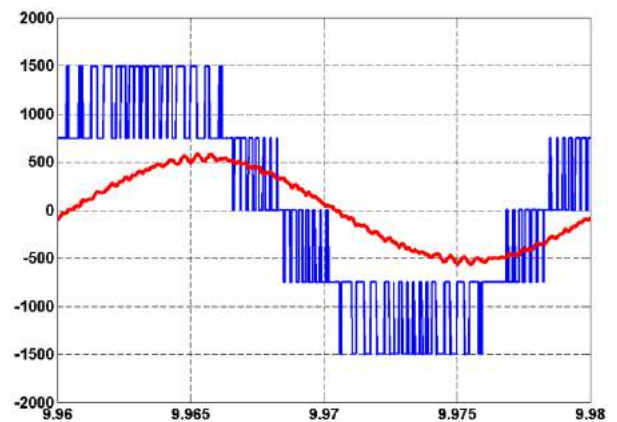


Рис. 9. Линейное напряжение  $U_{ab}$  и фазный ток  $I_a$  ГЭД запитываемого от трехуровневого АИН



На рисунке 10 представлен гармонический состав тока фазы ГЭД запитываемого от двухуровневого АИН.

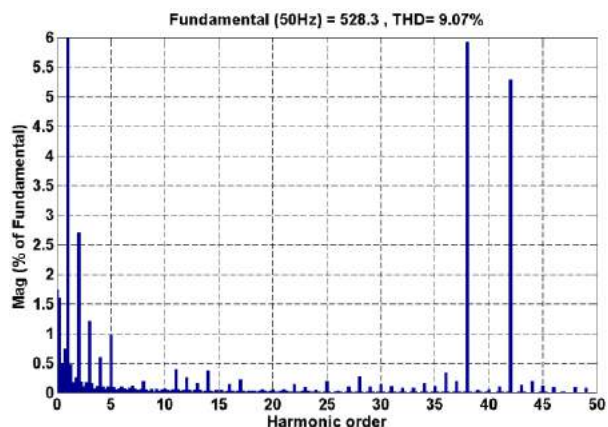


Рис. 10. Гармонический состав тока фазы ГЭД запитываемого от двухуровневого АИН

На рисунке 11 представлен гармонический состав тока фазы ГЭД запитываемого от трехуровневого АИН.

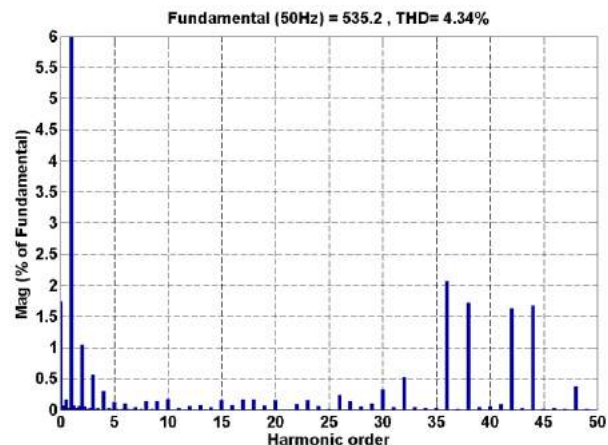


Рис. 11. Гармонический состав тока фазы ГЭД запитываемого от трехуровневого АИН

Из Рисунков 10 и 11 следует, что коэффициент несинусоидальности кривой тока в обмотке ГЭД при его питании от двухуровневого АИН составляет 9,07 %, а при питании от трехуровневого АИН – 4,34 %. Применение трехуровневого АИН позволяет значительно снизить искажения тока в обмотке ГЭД.

**Выводы**

1. Структура ЕЭЭС, разработанная специалистами фирмы Сименс, обеспечивает хорошую электромагнитную совместимость, но имеет структурную избыточность – согласующие трансформаторы.

2. ЕЭЭС фирмы Вяртсиля позволяет получить высокое качество напряжения судовой сети, но синхронизация генераторов электростанции производится через дополнительный трансформатор.

3. В ЕЭЭС с активным выпрямителем число силовых полупроводниковых приборов удваивается, что приводит к снижению надежности, кроме того, применение многоуровневых инверторов в такой структуре невозможно.

2. Многофазные синхронные генераторы дают возможность использовать в составе СЭД многоуровневые инверторы без согласующих трансформаторов, снизить токи короткого замыкания генераторов и понизить токи, коммутируемые автоматическими выключателями.

3. Выпрямители ПЧ целесообразно разместить в составе ГРЩ и передавать электроэнергию к АИН и ГЭД постоянным током, при этом мощность, коммутируемая автоматическими выключателями постоянного тока, может быть снижена до приемлемой величины за счет применения многоуровневых инверторов и многофазных ГЭД.

**Литература**

1. Патент WO 02/100716, Marine propulsion system with reduced on-board network distortion factor / Iden Stefan, Vaupel Gustav, приоритет 11.06.2001, патентообладатель Siemens AG.
2. Патент WO 2013/121077. Protection system of an electric network of a vessel / Djuve Svein, Hystad Egil, патентообладатель Wartsila Finland Oy.
3. Патент РФ №2436708, Судовая электроэнергетическая установка / Васин И.М., Сеньков А.П., Паперж Ю.Е., Токарев Л.Н., БИ 2011, №36.
4. Батрак Д.В., Калинин И.М., Кузнецов В.И., Сеньков А.П. Оценка качества напряжения питания в судовой электроэнергетической системе методом компьютерного моделирования // Электротехника. 2017. № 12. С. 18-23.
5. So-Yeon Kim, Byung-Geuk Cho, Seung-Ki Sul. Consideration of Active-Front-End Rectifier for Electric Propulsion Navy Ship // IEEE. - 2013.
6. Сеньков А.П., Кузнецов В.И., Бедкер А.А., Каченков А.В. Судовая электроэнергетическая установка. – Заявка на изобретение № 2018129804 от 15 августа 2018г.

**References**

1. Iden Stefan, Vaupel Gustav. Marine propulsion system with reduced on-board network distortion factor. Siemens AG, 11.06.2001.
2. Djuve Svein, Hystad Egil. Protection system of an electric network of a vessel. Wartsila Finland Oy, WO 2013/121077.

- 
3. Vasin I.M., Sen'kov A.P., Paperzh Yu.E., Tokarev L.N. Sudovaya elektroenergeticheskaya ustanovka. Patent RF № 2436708, 2011.
  4. Batrak D.V., Kalinin I.M., Kuznetsov V.I., Sen'kov A.P. Otsenka kachestva napryazheniya pitaniya v sudovoy elektroenergeticheskoy sisteme metodom komp'yuternogo modelirovaniya. Elektrotehnika. 2017. № 12. 18-23.
  5. So-Yeon Kim, Byung-Geuk Cho, Seung-Ki Sul. Consideration of Active-Front-End Rectifier for Electric Propulsion Navy Ship // IEEE. 2013.
  6. Sen'kov A.P., Kuznetsov V.I., Bedeker A.A., Kashchenkov A.V. Sudovaya elektroenergeticheskaya ustanovka. Zayavka na izobretenie № 2018129804. 15.08.2018.

УДК 629.5.03

## КРАТКИЙ ОБЗОР И АНАЛИЗ ПРИМЕРОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

**Валерий Викторович Медведев**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

**Валерий Николаевич Половинкин**

доктор технических наук, профессор,  
научный руководитель  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»  
196158, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44  
e-mail: krylov@krylov.spb.ru

**Владимир Васильевич Гаврилов**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры теории и конструкции судовых двигателей внутреннего сгорания  
Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова  
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: Gavrilov@vg5647.spb.edu

### Аннотация

В работе представлен краткий анализ и обзор работ, в которых имитационное моделирование использовалось при решении ряда актуальных задач в области проектирования и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания. Обширный потенциал имитационного моделирования сложных технических систем, к которым бесспорно относятся двигатели внутреннего сгорания (включая судовые), и, в частности, реализуемые в них рабочие процессы, прежде всего обуславливаются универсальным характером этого метода исследования. Метод имитационного моделирования разрешает исследовать задачи высокой сложности, обеспечивает имитацию разнообразных процессов, с большим количеством составляющих. В применяемых моделях могут использоваться отдельные функциональные зависимости, описываемые громоздкими математическими соотношениями. Поэтому имитационное моделирование эффективно используется в задачах исследования систем и процессов со сложной структурой. В работе рассмотрены типичные приемы и особенности реализации имитационного моделирования, учитывающие специфику исследованных объектов. Приведены особенности различных способов реализации моделирования.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, обзор, анализ, судовые двигатели внутреннего сгорания.

## BRIEF REVIEW AND ANALYSIS OF SIMULATION MODELING EXAMPLES OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

**Valery V. Medvedev**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor,  
Professor, Department of Marine Internal Combustion Engines and Diesel Plants  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

**Valery N. Polovinkin**

Dr.Sci.Tech, professor  
Research Advisor  
FSUE "Krylov State Research Center" 196158, St. Petersburg, Moscovskoye shosse, 44, e-mail:  
krylov@krylov.spb.ru

**Vladimir V. Gavrilov**

Dr.Sci.Tech, professor  
Professor of the Department of Theory and Design of Shipboard Internal Combustion Engines  
State University of Maritime and River Fleet named after adm. S.O. Makarov  
198035, St. Petersburg, Dvinskaya, 5/7  
e-mail: Gavrilov@vg5647.spb.edu

### Abstract

The paper presents a brief analysis and review of works in which simulation modeling was used in solving a number of urgent problems in the scope of design and operation of internal combustion engines. The vast potential of simulation modeling of complex technical systems, which undoubtedly include

internal combustion engines (including ship engines), and, in particular, the processes implemented in them, are primarily resulted from the general character of this research method. The method of simulation allows investigating tasks of high complexity, provides simulation of various processes, with a large number of components. In the models applied, individual functional dependencies can be used, described by cumbersome mathematics. Therefore, simulation modeling is effectively used in the tasks of researching systems and processes with a complex structure. The typical techniques and features of simulation modeling implementation, taking into account the specifics of the prototype systems, are reviewed. The features of various ways to implement the simulation are given.

**Keywords:** simulation modeling, review, analysis, ship internal combustion engines.

### Введение

Имитационное моделирование (ИМ) нашло широкое применение в различных научных исследованиях. В работе [1] дана краткая характеристика современного состояния развития ИМ в Российской Федерации и приведен обзор последних работ применительно к судовым энергетическим установкам (СЭУ) в целом, а также их отдельным элементам. Относительно двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в указанной работе сделана ремарка, в которой отмечено, что эти объекты заслуживают отдельного рассмотрения. Действительно, в фундаментальной работе [2] специальный раздел посвящен ИМ рабочих процессов в двигателях. В этом разделе справедливо отмечено, что ИМ позволяет производить учет статистики случайных факторов и событий во времени. Там же перечислены зарубежные и отечественные программные комплексы, применяемые для имитационного моделирования процессов двигателя, как-то: GT-Power и GT-Suite компании Gamma Technologie, Ricardo Wave компании Ricardo, AVL Boost корпорации AVL List GmbH, ALLBEA Уфимского государственного авиационного технического университета, ДИЗЕЛЬ-РК МГУ им. Н.Э. Баумана и др. Особое внимание уделено описанию системы имитационного моделирования (СИМ) Альбея-ДВС.

К перечисленным выше можно еще добавить разработки университетов: ICE RnD (Internal Combustion Engine Research and Development Library), которая нашла своих почитателей в Южно Уральском государственном университете, OpenWAM – Universitat Politècnica de València, GASYDYN – Politecnico di Milano и др.

Между тем, ИМ применяется не только при исследовании рабочих процессов двигателей, но и для решения задач конструирования и расчета двигателей и их основных узлов для обеспечения прочности, учета износов, оценки надежности. Также с помощью ИМ исследуются системы двигателей, процессы управления, испытаний и диагностики двигателей. В данной статье решается задача краткого обзора и анализа последних работ по указанной выше тематике. Рассмотрению подвергнуты не только судовые ДВС, поскольку существует достаточно примеров различных вариантов конверсии двигателей.

### Примеры имитационного моделирования двигателей внутреннего сгорания

Следует отметить, что обилие предлагаемого программного обеспечения (ПО) для реализации ИМ рабочего процесса и ДВС в целом позволяет сделать вывод о том, что сложность исследуемых явлений в двигателе не дает решительного преимущества

какому-либо конкретному ПО. Часто выбор исследователя определяется личными предпочтениями, связанными с доступностью, привычностью и т.п. Поэтому, помимо перечисленных выше ПО и СИМ, продолжается апробирование к решению указанной задачи программных комплексов, в принципе, предназначенных для решения более широкого круга задач гидродинамики и теплообмена и собственных оригинальных разработок.

Так, в работе [3] исследовались особенности работы программного комплекса Flow Vision в проекции к возможности решения задачи оптимизации подачи иницирующей добавки к основному топливу с целью повышения экологических и экономических показателей ДВС.

К работам, использующим оригинальные разработки можно отнести, например, автоматизированную систему ENGINE [4]. Автор реализовал в данном продукте ряд имитационных моделей рабочего процесса в ДВС, что позволяет решать целый спектр исследовательских задач, включающих оптимизацию рабочего процесса, вопросы диагностики, применения альтернативных топлив и снижения токсичности отработавших газов (ОГ). В качестве языков программирования использованы Delphi и Fortran.

Еще одним примером может служить работа [5], в которой, применительно к тронковым дизелям, представлены результаты использования разработанной имитационной модели трибодиагностики. Соответствующие программы реализованы на алгоритмическом языке Fortran и Mathematica. Развитие эти исследования нашли, например, в работах [6, 7].

Наивысшим способом реализации ИМ с помощью оригинальных программ на языках программирования высокого уровня можно считать государственную регистрацию таких программ. Этот путь был реализован при развитии направления представленного, например, в работе [8].

Использование метода ЦНИДИ, уравнения состояния рабочего тела Клапейрона-Менделеева, определение относительной скорости тепловыделения по полуэмпирической функции И.И. Вибе (следует отметить, что этот набор является основой большого числа реализаций ИМ) позволили авторам [9, 10] выполнить (в частности с использованием MS Excel и Visual Studio C++) ИМ рабочего процесса двигателя для получения информации о симптоматике его неисправностей. Это также помогло выполнить имитацию нарушения герметичности камеры сгорания ДВС и задать классы исправного и неисправного состояний.

Можно отметить, что применение интерфейсных возможностей MS Excel и встроенного в него языка программирования Basic вполне достаточны для



ознакомления с базовой практикой ИМ рабочих процессов в ДВС при обучении [11]. Имеется практика использования для целей обучения ИМ и ПО на основе Delphi [12].

Один из языков программирования высокого уровня использовался для реализации метода идентификации неисправностей дизеля с использованием ИМ рабочего процесса дизеля [13].

Векторная передаточная функция, полученная из модели, была использована для имитационного моделирования режима испытания с помощью Xcos – графического редактора для разработки гибридных моделей динамических систем, входящего в пакет прикладных математических программ SciLab. [14]. Предлагаемая работа посвящена компьютерному имитационному моделированию режимов работы дизелей. В структуре среды имитационного моделирования выделено 6 функциональных модулей. Модель исследуемой динамической системы задается с помощью специальных графических блоков. В разработанной среде имитационная модель описывается при помощи графического языка моделирования.

Возвратимся к обзору недавней практики применения специализированных комплексов ИМ рабочих процессов и ДВС в целом.

Начнем с некоторых примеров использования **СИМ Альбея-ДВС**. В работе [15] представлены результаты численных экспериментов с использованием разработанных автором математических моделей, описывающих процессы в топливopодпoдающей аппаратуре и камере сгорания двигателя с предлагаемым многотопливным рабочим циклом. На основе оригинальных математических моделей (рабочего процесса компрессор-форсунки; модели развития топливовоздушной струи в камере сгорания; модели сгорания) исследовано влияние характеристики выгорания топлива в предложенном автором рабочем цикле на эффективный КПД и скорость нарастания давления. Приведена оценка перспективности снижения эмиссии оксида азота за счет увеличения содержания воды в зоне реакции.

Реализация предложенных в [16] моделей позволяет прогнозировать влияние конструкции двухконтурной системы впуска как на наполнение, так и на интегральные параметры газодинамического состояния заряда для оценки возможности улучшения показателей ДВС на частичных режимах. Модели реализованы в программных модулях (ТРУБКА, ЦИЛИНДР, АТМОСФЕРА, КЛАПАН, ТРОЙНИК) СИМ Альбея, которые позволили автору создавать модели газозвдушного тракта из стандартных элементов и проводить сквозное ИМ.

В работе [17] приведены результаты рассмотрения особенностей смены заряда и смесеобразования в штанговом дизель-молоте. Авторами разработана математическая модель, которая позволила определить значения коэффициента наполнения (реальное и предельное). На основе ИМ с использованием СИМ Альбея, предложены рекомендации для повышения качества смесеобразования.

Можно заметить сложившуюся практику применения СИМ Альбея в учебном процессе, когда на ее основе студент может проводить (естественно

при опытном руководителе) исследование достаточно сложных моделей ДВС [18].

Замечательно, когда результаты ИМ находят экспериментальное подтверждение. Так, численные исследования возможности интенсификации волновой дозарядки четырехтактного ДВС волной сжатия, генерируемой в процессе выпуска, выполненные в [19] с использованием программы «HorsepowerLab1D» (являющейся модификацией СИМ Альбея), проверены экспериментально [20].

Приведенные выше примеры показывают, что СИМ Альбея эффективно сочетается с оригинальными методиками расчета характеристик отдельных элементов ДВС, например, системы впуска и выпуска, топливной аппаратуры и т.д. В работе [21] система позволила исследовать возможности применения различного привода нагнетателя двигателя.

Одним из последних известных примеров использования для ИМ программного комплекса **«Дизель-ПК»** может служить работа [22]. В ней комплекс позволил определить параметры, характеризующие процесс газообмена ДВС, что способствовало реализации предложенной комплексной математической модели, учитывающей параметры электромагнитного механизма в рабочих режимах работы клапана.

Следует особо указать на последние успехи в создании математической модели и программного обеспечения для имитационного моделирования ДВС в ПО **ICE RnD** [23, 24]. Основой данной модели является метод энергетического и массового баланса и теория бондграфов. ПО представляет собой библиотеку элементов, описывающих процессы в системах и механизмах двигателя. Оно, в частности, используется для решения задач обеспечения пуска дизелей различного назначения и совершенствования методов и средств предупредительной подготовки и облегчения пуска.

В работе [25] описан алгоритм автоматического отключения части работающих цилиндров ДВС, использованный при реализации ИМ в среде **MatLab/Simulink**. В этой же среде авторы [26], реализуя процесс ИМ, решали задачи диагностирования дизель-генератора, а в [27] – выполнен поиск рациональных режимов долива моторного масла, которые позволили бы минимизировать отрицательное влияние долива на работу двигателя и снижение срока необслуживаемой работы средств очистки.

Можно отметить, что в приведенных выше примерах ИМ используют, в основном, такие модели, которые часто называют «нульмерными» [28], что предполагает одинаковость протекания процессов во всех точках объема камеры сгорания (таким образом, процесс не имеет линейной протяженности и уподобляется процессу в точке нулевой величины). Переход от этих моделей к «не нульмерным», требует применения методов CFD (Computational Fluid Dynamics). Использование современных программных комплексов, например, ANSYS Fluent, NUMECA, CD-adapco StarCD/CCM+, FlowVision, и т.д. требует наличия значительных вычислительных ресурсов. Задача намного усложняется, если имитировать воздействие случайных факторов на внутрицилиндровые процессы, например, в следствие неравномерности износа или

закоксовывания сопловых отверстий топливных форсунок или влияния технологических отклонений (даже находящихся в пределе поля допусков). Можно ожидать получения многих интересных с практической и научной точек зрения результатов при использовании метода Монте-Карло. Однако, из-за отмеченных выше вычислительных сложностей, данный метод пока нашел применение при решении «одномерных» (по времени) задач. Например, в [29, 30, 31, 32, 33] при ИМ решались задачи прогноза ресурса деталей на основе учета рассеяния характеристик износа, прочности деталей и действующих в них напряжений, а также имитировались различные сценарии развития усталостных трещин. При реализации расчетов использовались языки программирования высокого уровня Fortran и Delphi.

### Заключение

Выполненный обзор и анализ выявленных работ показал, что при проведении исследований достаточно часто используются мощные программные средства для осуществления ИМ (специализированные и универсальные). Они

облегчают процесс испытаний, но не касаются самой трудоемкой процедуры сбора исходной информации, ее интерпретации, формализации и адекватного соотношения с конкретной задачей. Следует отметить, что освоение таких программных средств требует значительных усилий, что приводит к определенной специализации на их использовании групп исследователей, получивших, в силу разных обстоятельств, доступ как к самим СИМ, так и к учебной литературе, обучающим семинарам и т.п. При этом используется ПО весьма ограничено, по мере поступления заказов на проведение исследований. Для остальных специалистов остаются также вопросы, связанные с доступностью этих программных продуктов и возможностью их освоения в сроки, которые бывают весьма ограниченными. В этих условиях авторы многих исследований создают достаточно универсальные программные продукты на основе языков программирования высокого уровня, пригодных для реализации процедуры ИМ и использования в процессе исследования ДВС и реализуемых в них процессов.

### Литература

1. Медведев В.В., Хруцкий О.В., Равин А.А. Краткий обзор и анализ примеров имитационного моделирования судовых энергетических установок и их элементов // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – №4(42). – Т.1. – С.138-144.
2. Машиностроение. Энциклопедия. Т.IV-14. Двигатели внутреннего сгорания / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков и др.; Под общ. ред. А.А. Александрова и Н.А. Иващенко. – М.: Машиностроение, 2013. – 784 с.
3. Певнев Н.Г., Понамарчук В.В. Возможности математического моделирования процесса горения топливовоздушной смеси в двигателях внутреннего сгорания // Техника и технологии строительства. – 2016. – №1(5). – 4 с.
4. Булыгин Ю.И. Основы моделирования внутрицилиндровых процессов и токсичности дизелей тепловозов: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02 / Булыгин Юрий Игоревич. – Самарская государственная академия путей сообщения. Ростов-на-Дону, 2006. – 44 с.
5. Надежкин А.В. Мониторинг работающего моторного масла в системе обеспечения безопасной ресурсосберегающей эксплуатации судовых дизелей: автореф. дис. д-ра тех.наук: 05.08.05 / Надежкин Андрей Вениаминович. – Владивосток, 2011. – 16 с.
6. Кича Г.П., Надежкин А.В., Пак Н.К. Имитационное моделирование изнашивания судового дизеля при его функционировании в составе комплекса "двигатель-топливо-масло" // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – №1. – С.242-246.
7. Голенищев А.В., Надежкин А.В., Старченко М.Е. Моделирование влияния эксплуатационных факторов на режимы трения и изнашивания в подшипниках скольжения судовых дизелей // Морские интеллектуальные технологии. – 2015. – №3(29). – Т.1. – С.108-113.
8. Посметьев В.И., Кадырметов А.М., Никонов В.О. Имитационное моделирование и исследование процесса распространения тепла в коленчатом вале при восстановлении его шеек плазменным напылением с одновременной электромеханической обработкой // Совершенствование конструкции, эксплуатации и техн. сервиса автотрактор. и с.-х. техники / Башкир. гос. аграр. ун-т. – Уфа, 2013. – С.337-344.
9. Обозов А.А., Таричко В.И. Математическое имитационное моделирование рабочего процесса автомобильного ДВС в целях получения диагностической информации // Двигателестроение. – 2013. – №2. – С.21-25.
10. Обозов А.А. Применение метода имитационного моделирования рабочего процесса ДВС как средства алгоритмизации систем технической диагностики // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2009. – №2(22). – С.99-104.
11. Щеткин Б.Н. Имитационное моделирование при выполнении курсового проекта по дисциплине «Двигатели внутреннего сгорания» // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – №5-2. – С.232-236.
12. Медведев В.В. Использование имитационного моделирования для прогнозирования вероятности отказа коленчатых валов судовых дизелей на заданный период эксплуатации в дисциплине «Основы надежности и диагностики» // Материалы Третьей Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». – СПб, 2007. – Т.II. – С. 133-137.
13. Лашко В.А., Коньков А.Ю. Применение методов имитационного моделирования рабочих процессов дизеля при интерпретации результатов диагностического эксперимента // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2007. – №6. – С.46-53.

14. Зубков Е.В. Модуль имитационного моделирования режимов работы дизелей автоматизированной системы испытаний // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – №11-1. – С.49-53.
15. Гарипов М.Д. Многотопливный рабочий цикл поршневых ДВС: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02 / Гарипов Марат Данилович. – Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет). Челябинск, 2013. – 32 с.
16. Еникеев Р.Д. Повышение эффективных и экологических показателей ДВС газодинамическими методами: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02 / Еникеев Рустэм Далилович. – Уфа, 2009. – 32 с.
17. Рудой И.Б., Юдаев М.М. Имитационное моделирование рабочего процесса штангового дизель-молота // *Ползуновский вестник*. – 2006. – №4-1. – С.157-160.
18. Губайдуллина Р.Р., Минашин В.С. Моделирование двигателя с индивидуальными впускными трубами в системе имитационного моделирования "Альбея" // *Проблемы науки*. – 2018. – №7(31). – С.43-45.
19. Атанов С.Н. Исследование дозарядки четырехтактного двигателя через впускной клапан волной сжатия, генерируемой в процессе выпуска // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. – 2013. – Т.17. – №3(56). – С.209-216.
20. Атанов С.Н., Еникеев Р.Д. Экспериментальное исследование метода повышения коэффициента наполнения четырехтактного двигателя внутреннего сгорания интенсификацией дозарядки // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. – 2017. – Т.21. – №1(75). – С.38-44.
21. Салимгареев М.М., Вахитов Ю.Р. Повышение мощности двигателя ВА3-21124 при помощи механического наддува // *Молодежный вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. – 2018. – №1(18). – С.128-132.
22. Гильмияров К.Р., Павленко А.В., Большенко И.А., Гуммель А.А. О влиянии внешних возмущающих воздействий на параметры электромагнитных приводов клапанов систем воздухогазообмена и топливоподачи двигателей внутреннего сгорания // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2018. – Т.61. – №4. – С.55-63.
23. Малозёмов А.А., Кукис В.С., Гимазетдинов Р.Р. Разработка математической модели и программного обеспечения для имитационного моделирования поршневых ДВС // *Двигателестроение*. – 2018. – №3(273). – С.3-9.
24. Бондарь В.Н., Малозёмов А.А., Кукис В.С. Математическая модель и программное обеспечение для имитационного моделирования дизеля на режимах предпусковой подготовки и пуска // *Наукоград наука производство общество*. – 2017. – №2. – С.54-62.
25. Журавлев С.С., Зубарев К.В. Апробация способа управления мощностью ДВС отключением цилиндров // *Техника и технологии строительства*. – 2015. – №3(3). – С.14-20.
26. Борисенко А.Н., Обод П.С., Халанская Е.В. Имитационное моделирование девиации угловой скорости вала дизель-генератора и получение информативных параметров для систем управления и диагностики на базе гистограммного анализа // *Вестник НТУ "ХПИ"*. – 2008. – Вып.31. – С.14-20.
27. Надежкин А.В., Соколова И.В. Имитационное моделирование влияния режимов долива моторного масла на эффективность эксплуатации судовых двигателей // *Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета*. – 2011. – №24. – С.98-102.
28. Галышев Ю.В., Зайцев А.Б., Сидоров А.А., Шабанов А.Ю. Рабочие процессы и токсичность отработавших газов судовых дизельных и газопоршневых двигателей: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 160 с.
29. Медведев В.В. Оценка риска эксплуатации ДВС при использовании деталей с трещинами // *Турбины и дизели*. – 2008, №2. – С.12-14.
30. Медведев В.В., Половинкин В.Н. Использование имитационного моделирования для обеспечения надежности и безопасности судовых дизелей // *Материалы Четвертой Всероссийской научно-практической конференции "Имитационное моделирование. Теория и практика"*. – СПб.: Изд-во ОАО ЦТСС, 2009. – Т.II. – С. 159-164.
31. Семионичев Д.С. Управление техническим состоянием судовой энергетической установки на основе метода формализованной оценки безопасности: дис. ... к-та техн. наук: 05.08.05 / Семионичев Дмитрий Сергеевич. – СПб.: СПГУВК, 2010. – 231 с.
32. Медведев В.В. Применение имитационного моделирования для обеспечения надёжности и безопасности судовых энергетических установок: монография. – СПб.: Страта, 2013. – 352 с.
33. Румб В.К. Прогнозирование долговечности деталей ДВС средствами имитационного моделирования // *Двигателестроение*. – 2015. – №4(262). – С.26-29.

#### References

1. Medvedev V.V., Khrutskiy O.V., Ravin A.A. Kratkiy obzor i analiz primerov imitatsionnogo modelirovaniya sudovykh energeticheskikh ustanovok i ikh elementov. *Morskiye intellektual'nyye tekhnologii*. 2018. N4(42). T.1. S.138-144. (In Russian)
2. Mashinostroyeniye. Entsiklopediya. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. T.IV-14. M.: Mashinostroyeniye, 2013. 784 s. (In Russian)
3. Pevnev N.G., Ponamarchuk V.V. Vozmozhnosti matematicheskogo modelirovaniya protsessa goreniya toplivovozdushnoy smesi v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya. *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva*. 2016. N1(5). 4 s. (In Russian)
4. Bulygin YU.I. Osnovy modelirovaniya vnutritsilindrovyykh protsessov i toksichnosti dizeley teplovozov: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk. Samarskaya gosudarstvennaya akademiya putey soobshcheniya. Rostov-na-Donu, 2006. 44 s. (In Russian)

5. Nadezhkin A.V. Monitoring rabotayushchego motornogo masla v sisteme obespecheniya bezopasnoy resursosbergayushchey ekspluatatsii sudovykh dizeley: avtoref. dis. d-ra tekhn.nauk. Vladivostok, 2011. 16 s. (In Russian)
6. Kicha G.P., Nadezhkin A.V., Pak N.K. Imitatsionnoye modelirovaniye iznashivaniya sudovogo dizelya pri yego funktsionirovaniy v sostave kompleksa "dvigatel'-toplivo-maslo". Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka. 2013. N1. S.242-246. (In Russian)
7. Golenishchev A.V., Nadezhkin A.V., Starchenko M.Ye. Modelirovaniye vliyaniya ekspluatatsionnykh faktorov na rezhimy treniya i iznashivaniya v podshipnikakh skol'zheniya sudovykh dizeley. Morskiye intellektual'nyye tekhnologii. 2015. N3(29). T.1. S.108-113. (In Russian)
8. Posmet'yev V.I., Kadyrmetov A.M., Nikonov V.O. Imitatsionnoye modelirovaniye i issledovaniye protsessa rasprostraneniya tepla v kolenchatom vale pri vosstanovlenii yego sheyek plazmennym napyleniyem s odnovremennoy elektromekhanicheskoy obrabotkoy. Sovershenstvovaniye konstruksii, ekspluatatsii i tekhn. servisa avtotraktor. i s.-kh. Tekhniki. Bashkir. gos. agrar. un-t. Ufa, 2013. S.337-344 (In Russian)
9. Obozov A.A., Tarichko V.I. Matematicheskoye imitatsionnoye modelirovaniye rabocheho protsessa avtomobil'nogo DVS v tselyakh polucheniya diagnosticheskoy informatsii. Dvigatolestroyeniye. 2013. N2. S.21-25. (In Russian)
10. Obozov A.A. Primeneniye metoda imitatsionnogo modelirovaniya rabocheho protsessa DVS kak sredstva algoritmizatsii sistem tekhnicheskoy diagnostiki. Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2009. N2(22). S.99-104. (In Russian)
11. Shchetkin B.N. Imitatsionnoye modelirovaniye pri vypolnenii kursovogo proyekta po distsipline «Dvigateli vnutrennego sgoraniya». Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya. 2015. N5-2. S.232-236. (In Russian)
12. Medvedev V.V. Ispol'zovaniye imitatsionnogo modelirovaniya dlya prognozirovaniya veroyatnosti otkaza kolenchatykh valov sudovykh dizeley na zadannyi period ekspluatatsii v distsipline «Osnovy nadezhnosti i diagnostiki». Materialy Tret'yey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Imitatsionnoye modelirovaniye. Teoriya i praktika". SPb, 2007. T.II. S. 133-137. (In Russian)
13. Lashko V.A., Kon'kov A.YU. Primeneniye metodov imitatsionnogo modelirovaniya rabocheho protsessa dizelya pri interpretatsii rezul'tatov diagnosticheskogo eksperimenta. Izvestiya VUZov. Mashinostroyeniye. 2007. N6. S.46-53 (In Russian)
14. Zubkov Ye.V. Modul' imitatsionnogo modelirovaniya rezhimov raboty dizeley avtomatizirovannoy sistemy ispytaniy. Fundamental'nyye issledovaniya. 2015. N11-1. S.49-53. (In Russian)
15. Garipov M.D. Mnogotoplivnyy rabochiy tsikl porshnevykh DVS: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk. Yuzhno-Ural'skiy gosudarstvennyy universitet (natsional'nyy issledovatel'skiy universitet). Chelyabinsk, 2013. 32 s. (In Russian)
16. Yenikeev R.D. Povysheniye effektivnykh i ekologicheskikh pokazateley DVS gazodinamicheskimi metodami: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk. Ufa. 2009. 32 s. (In Russian)
17. Rudoy I.B., Yudayev M.M. Imitatsionnoye modelirovaniye rabocheho protsessa shtangovogo dizel'-molota. Polzunovskiy vestnik. 2006. № 4-1. S.157-160. (In Russian)
18. Gubaydullina R.R., Minashin V.S. Modelirovaniye dvigatelya s individual'nymi vpusknymi trubami v sisteme imitatsionnogo modelirovaniya "Al'beya". Problemy nauki. 2018. N7(31). S.43-45. (In Russian)
19. Atanov S.N. Issledovaniye dozaryadki chetyrekhtaktnogo dvigatelya cherez vpusknoy klapan volnoy szhatiya, generiruyemoy v protsesse vypuska. Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. 2013. T.17. N3(56). S. 209-216. (In Russian)
20. Atanov S.N., Yenikeev R.D. Eksperimental'noye issledovaniye metoda povysheniya koeffitsiyenta napolneniya chetyrekhtaktnogo dvigatelya vnutrennego sgoraniya intensivatsiyey dozaryadki. Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. 2017. T.21. N1(75). S. 38-44 (In Russian)
21. Salimgareyev M.M., Vakhitov YU.R. Povysheniye moshchnosti dvigatelya VAZ-21124 pri pomoshchi mekhanicheskogo nadduva. Molodezhnyy vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. 2018. N1(18). S.128-132 (In Russian)
22. Gil'miyarov K.R., Pavlenko A.V., Bol'shenko I.A., Gummel' A.A. O vliyaniy vneshnikh vozmushchayushchikh vozdeystviy na parametry elektromagnitnykh privodov klapanov sistem vozdukhogazoozbmena i toplivopodachi dvigateley vnutrennego sgoraniya. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika. 2018. T.61. N4. S.55-63 (In Russian)
23. Malozomov A.A., Kukis V.S., Gimazetdinov R.R. Razrabotka matematicheskoy modeli i programmnoy obespecheniya dlya imitatsionnogo modelirovaniya porshnevykh DVS. Dvigatolestroyeniye. 2018. N3(273). S.3-9. (In Russian)
24. Bondar' V.N., Malozomov A.A., Kukis B.S. Matematicheskaya model' i programmnoye obespecheniye dlya imitatsionnogo modelirovaniya dizelya na rezhimakh predpuskovoy podgotovki i puska. Naukograd nauka proizvodstvo obshchestvo. 2017. N2. S.54-62 (In Russian)
25. Zhuravlev S.S., Zubarev K.V. Aprobatsiya sposoba upravleniya moshchnosti DVS otklyucheniyem tsilindrov. Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva. 2015. N3(3). S.14-20. (In Russian)
26. Borisenko A.N., Obod P.S., Khalanskaya Ye.V. Imitatsionnoye modelirovaniye devyatsii uglovoy skorosti vala dizel'-generatora i polucheniye informativnykh parametrov dlya sistem upravleniya i diagnostiki na baze gistogrammnoy analiza. Vestnik NTU "KHPI". 2008. Vyp.31. S.14-20 (In Russian)
27. Nadezhkin A.V., Sokolova I.V. Imitatsionnoye modelirovaniye vliyaniya rezhimov doliva motornogo masla na effektivnost' ekspluatatsii sudovykh dvigateley. Nauchnyye trudy Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo rybokhozyaystvennogo universiteta. 2011. N24. S.98-102. (In Russian)

- 
28. Galyshev YU.V., Zaytsev A.B., Sidorov A.A., Shabanov A.YU. Rabochiye protsessy i toksichnost' otrabo-tavshikh gazov sudovykh dizel'nykh i gazoporshnevykh dvigateley: ucheb. posobiye. SPb.: Izd-vo Poli-tekhn. un-ta, 2018. 160 s. (In Russian)
  29. Medvedev V.V. Otsenka riska ekspluatatsii DVS pri ispol'zovanii detaley s treshchinami. Turbiny i dizeli. 2008. N2. S.12-14. (In Russian)
  30. Medvedev V.V., Polovinkin V.N. Ispol'zovaniye imitatsionnogo modelirovaniya dlya obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti sudovykh dizeley. Materialy Chetvertoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Imitatsionnoye modelirovaniye. Teoriya i praktika". SPb: Izd-vo OAO TSTSS, 2009. T.II. S. 159-164. (In Russian)
  31. Semionichev D.S. Upravleniye tekhnicheskim sostoyaniyem sudovoy energeticheskoy ustanovki na osnove metoda formalizovannoy otsenki bezopasnosti: dis. ... k-ta tekhn. Nauk. SPb. SPGUVK. 2010. 231 s. (In Russian)
  32. Medvedev V.V. Primeneniye imitatsionnogo modelirovaniya dlya obespecheniya nadozhnosti i bezopasnosti sudovykh energeticheskikh ustanovok: monografiya. SPb. Strata, 2013. 352 s. (In Russian)
  33. Rumb V.K. Prognozirovaniye dolgovechnosti detaley DVS sredstvami imitatsionnogo modelirovaniya. Dvigatlestroyeniye. 2015. N4(262). S.26-29 (In Russian)

УДК 621.436

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

**Владимир Анатольевич Жуков**

доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой теории и конструкции судовых двигателей внутреннего сгорания  
Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова  
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: va\_zhukov@rambler.ru

**Валерий Николаевич Половинкин**

доктор технических наук, профессор,  
научный руководитель  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»  
196158, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44  
e-mail: krylov@krylov.spb.ru

**Валерий Викторович Медведев**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

**Андрей Араратович Пуляев**

аспирант  
Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова  
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: kaf\_sdvs@gumrf.ru

### Аннотация

В работе представлена математическая модель двухфазного течения жидкости в гладкой горизонтальной трубе, позволяющая корректно описывать процессы тепло- и массообмена в двухфазном турбулентном потоке.

Выполненное численное моделирование процессов теплообмена в трубе позволило установить влияние давления на структуру потока и параметры, влияющие на интенсивность теплопередачи, такие как турбулентная вязкость, теплопроводность потока, энтальпия потока.

Численное моделирование проводилось в диапазоне изменения давлений, характерных для систем высокотемпературных систем охлаждения, которые находят все более широкое применение в конструкциях современных форсированных судовых дизелей. Для проведения численного эксперимента использовался программный продукт ANSYS.

На основании результатов проведенных исследований можно сделать вывод, что высокотемпературное охлаждение судовых дизелей способно не только обеспечить повышение эффективных показателей работы двигателей, но и оказывает положительное влияние на ресурсные показатели двигателей. Это обусловлено повышением давления в системах высокотемпературного охлаждения и, как следствие, снижением вероятности появления поверхностного кипения на охлаждаемых поверхностях.

В статье показано, что дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение процессов теплообмена в полостях охлаждения реальных двигателей, на научное обоснование выбора параметров охлаждения и на анализ возможностей совершенствования физико-химических свойств охлаждающих жидкостей судовых ДВС. Для проведения таких исследований необходимо использовать полученные в работе результаты.

**Ключевые слова:** судовые дизели, высокотемпературное охлаждение, математическая модель, численное моделирование, процессы теплообмена, турбулентная вязкость, теплопроводность потока, энтальпия потока, коррозионно-эрозийные разрушения.

## STUDY OF THE HEAT EXCHANGE PROCESS IN HIGH-TEMPERATURE COOLING SYSTEMS OF MARINE DIESEL ENGINES

**Vladimir A. Zhukov**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor,  
Head of the Department of Theory and Design of Shipboard Internal Combustion Engines  
State University of Maritime and River Fleet named after adm. S.O. Makarov  
198035, St. Petersburg, st. Dvinskaya, 5/7  
e-mail: va\_zhukov@rambler.ru

**Valery N. Polovinkin**

Dr.Sci.Tech, professor

Research Advisor

FSUE "Krylov State Research Center" 196158, St. Petersburg, Moscovskoye shosse, 44, e-mail:

krylov@krylov.spb.ru

**Valery V. Medvedev**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor,

Professor, Department of Marine Internal Combustion Engines and Diesel Plants

St. Petersburg State Marine Technical University

190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3

e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

**Andrei A. Pulyaev**

post-graduate student

State University of Maritime and River Fleet named after adm. S.O. Makarov

198035, St. Petersburg, st. Dvinskaya, 5/7

e-mail: kaf\_sdvs@gumrf.ru

**Abstract**

The paper presents a mathematical model of two-phase fluid flow in a smooth horizontal pipe, which makes it possible to correctly describe the processes of heat and mass exchange in a two-phase turbulent flow.

The performed numerical simulation of heat exchange processes in a pipe made it possible to determine the effect of pressure on the flow structure and parameters affecting the heat transfer intensity, such as turbulent viscosity, thermal conductivity of flow, and enthalpy of flow.

Numerical simulation was carried out in the range of pressure changes specific for high-temperature cooling systems, which are increasingly used in the design of modern forced marine diesel engines. For carrying out the numerical experiment, the software product ANSYS was used.

Based on the results of the research, it can be concluded that high-temperature cooling of marine diesel engines can not only improve the effective performance of the engines, but also has a positive effect on the resource performance of the engines. This is due to an increase in pressure in high-temperature cooling systems and, as a result, a decrease in the likelihood of surface boiling on cooled surfaces.

The article shows that further research should focus on the study of heat exchange processes in the cooling cavities of real engines, on the scientific substantiation of the choice of cooling parameters and on the analysis of potential for improving the physical-chemical properties of cooling fluids of shipboard internal combustion engines. To conduct such studies, it is necessary to use the results obtained in the work.

**Keywords:** marine diesel engines high-temperature cooling, mathematical model, numerical simulation, heat exchange processes, turbulent viscosity, thermal conductivity of flow, enthalpy of flow, corrosive erosion damage.

**Введение**

Современные форсированные дизели, используемые в качестве главных и вспомогательных двигателей в составе судовых энергетических установок, характеризуются высокими тепловыми и механическими нагрузками на детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ) [1, 2]. Для большинства таких двигателей именно теплонапряженное состояние деталей ЦПГ определяет их ресурсные показатели [3]. По этой причине обеспечение допустимого температурного уровня деталей путем совершенствования конструкции системы охлаждения двигателей и выбора рациональных параметров охлаждения (в первую очередь температуры охлаждающей жидкости) представляется актуальной задачей [4].

Устойчивой тенденцией совершенствования и развития жидкостных систем охлаждения двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является повышение температурного уровня [5, 6] и переход на высокотемпературное охлаждение (ВТО) [7]. Положительное влияние ВТО на ресурсные и экономические показатели форсированных ДВС описано в работах [8, 9, 10]. Перспективность высокотемпературных систем охлаждения подтверждается тем, что ведущие зарубежные и

отечественные двигателестроительные фирмы оснащают ими свои двигатели. В работе [11] приведены сведения о более чем 20 моделях двигателей таких производителей как MAN B&W Diesel Ltd, Caterpillar, General Motors, Wartsila/Sulzer, Deutz AG, ОАО «Барнаултрансмаш», в диапазоне мощностей от 110 до 3680 кВт, с диаметрами цилиндров от 146 до 457 мм и частотой вращения коленчатого вала – 277...2200 мин<sup>-1</sup>. Температура охлаждающей воды перечисленных двигателей составляет от 115 до 126°С. Это свидетельствует, что ВТО может успешно применяться на мало-, средне- и высокооборотных двигателях различной размерности.

Повышение температуры охлаждающей жидкости может быть обеспечено либо за счет применения в качестве теплоносителя специальных жидкостей, либо – путем повышения давления в системе ВТО, при использовании в качестве теплоносителя воды. Для судовых ДВС второй способ является более приемлемым. В работах, посвященных системам ВТО ДВС, доказывающих преимущества ВТО, недостаточно внимания уделено влиянию параметров в полостях охлаждения на процесс теплоотдачи от охлаждаемых поверхностей к охлаждающей жидкости. Исследованию наиболее



важных параметров, характеризующих влияние давления в системе ВТО на процессы теплообмена, посвящена данная работа.

**1. Математическая модель течения жидкости**

Системы охлаждения современных ДВС характеризуются сложной формой трубопроводов, каналов, полостей, в которых имеют место потоки охлаждающей жидкости с изменяющимися режимами течения, как по участкам системы, так и по времени. Для обеспечения возможности верификации модели и получения достоверной информации о влиянии давления в полостях охлаждения на параметры теплопереноса от охлаждаемой поверхности к жидкости, было принято решение о численном моделировании течения жидкости в цилиндрической трубе. Расчетная схема трубы представлена на рис.1: длина трубы – 2000 мм, диаметр – 20 мм, скорость воды  $v = 1$  м/с, температура трубы по всей поверхности  $T = 393,15$  К. На вход в трубу подавалась недогретая вода с температурой  $T_1 = 353,15$  К, кинематическая вязкость воды при заданных условиях составляла  $\nu = 0,366 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с [12]. Численное моделирование проводилось при различных значениях давления в трубе с использованием лицензионного программного продукта ANSYS, который реализует метод конечных элементов и позволяет решить задачу теплопереноса [13]. В основе математической модели лежит система дифференциальных уравнений сплошности потока, течения вязкой жидкости и теплоотдачи [14].

На первом этапе численного моделирования с целью верификации модели был выполнен расчет процессов теплообмена в трубе при давлении 0,1 МПа, в результате которого была получена структура потока, совпадающая с классической, представленной на рис.2 и описанной в источнике [15].

Структура двухфазного потока характеризует объемное содержание паровой и жидкой фаз, их границы, распределение по сечению трубы. По мере нагрева потока массовые и объемные доли фаз изменяются, что сказывается на структуре потока и скоростях фаз. Предельными случаями являются однофазные потоки жидкости (масса пара равна нулю) и пара (жидкость отсутствует). Между этими предельными состояниями можно выделить ряд устойчивых сочетаний структуры потока и скорости фаз, характеризующихся режимами течения двухфазных потоков. Каждому режиму течения можно соотнести свои зависимости между расходными и истинными параметрами двухфазного потока.

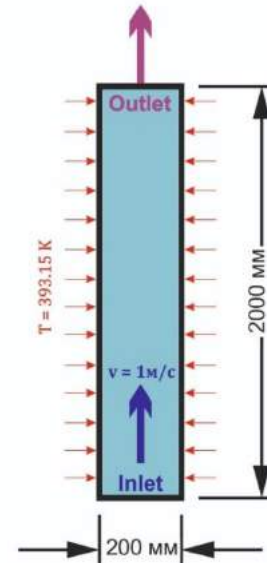


Рис.1. Расчетная схема математической модели теплообмена



Рис.2. Структура двухфазного потока при кипении жидкости внутри вертикальной трубы:

1 зона – недогретая (до температуры насыщения) вода, 2 – поверхностное кипение, 3 – эмульсионный режим, 4 – пробковый режим, 5 – стержневой режим по пару, 6 – стержневой режим влажного пара

Совпадение характера распределения паровой фазы в потоке позволяет считать, что созданная математическая модель адекватно описывает протекающие в трубе процессы и численный эксперимент позволит получить достоверные результаты. В качестве базы для сравнения использовались результаты расчета, полученные при атмосферном давлении (0,1 МПа). Последующие расчеты выполнялись для давлений, характерных для существующих и перспективных систем ВТО (0,1...0,5 МПа). Наиболее существенными являются отличия результатов, полученных для наибольшего и наименьшего значений давления из указанного диапазона.

**2. Результаты численного моделирования процесса теплопереноса**

Первой задачей, которая решалась при проведении численного эксперимента, было определение влияния давления в трубе на структуру потока, так как именно она определяет характер протекания процессов теплопереноса.

На рис.3 приведено сравнение структуры потока в трубе при давлениях 0,1 и 0,5 МПа. В обоих случаях весь объем можно разделить на соответствующие зоны. Разница состоит в протяженности рассматриваемых зон: зона недогретой воды и зона поверхностного кипения более при повышенном давлении имеют большую протяженность. Это означает более длительный и постепенный переход к эмульсионному режиму, в котором начинает появляться тонкая пленка поверхностного кипения.

Протяженность зон I и II при давлении 0,1 МПа в сумме составляет 266 мм, а при давлении 0,5 МПа их

суммарная протяженность – 848 мм. Таким образом при повышении давления в трубе в 5 раз, участок без пленочного кипения увеличивается более чем в 3 раза.

Присутствие пленочного режима кипения вызывает эрозионно-коррозионные разрушения охлаждаемых поверхностей, которые наиболее вероятны в форсированных высокооборотных двигателях [16]. На основании результатов численного моделирования можно сделать вывод, что повышение давления в полости охлаждения до 0,5 МПа, позволяет повысить температуру охлаждающей воды до 120...125°C (при температуре кипения  $t_{кип} = 150^\circ\text{C}$ ) в зоне развитого поверхностного кипения (конец зоны II на рис.3) и исключить появление пленочного кипения (начало зоны III на рис.3). Таким образом, обеспечивается повышение ресурса деталей ЦПГ форсированных высокооборотных ДВС с ВТО.

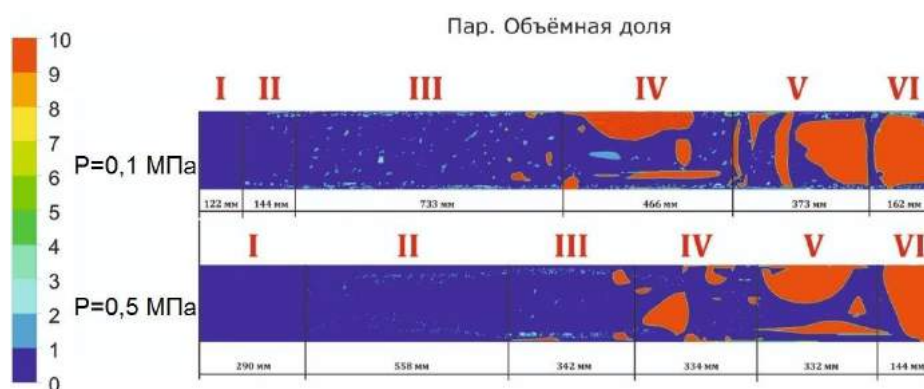


Рис.3. Структура потока и объемные доли пара в трубе при давлении 0,1 МПа и 0,5 МПа

При рассмотрении процессов теплообмена необходимо выделить случаи ламинарного и турбулентного режимов течения жидкости.

При ламинарном режиме течения поле скорости может быть найдено из решения стационарных уравнений Навье-Стокса, которые описывают распределение скорости и давления в потоке жидкости. Можно предположить, что скорость жидкости не изменяется во времени, и получить точное описание характеристик потока.

Расход жидкости при установившемся ламинарном течении вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе круглого сечения описывается законом Пуазейля. Согласно закону, секундный объемный расход жидкости Q прямо пропорционален перепаду давления на единицу длины трубки (градиенту давления в трубе) и четвертой степени радиуса (диаметра) трубы и обратно пропорционален коэффициенту вязкости жидкости [17]:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4}{8\eta \cdot \ell} (p_1 - p_2) = \frac{\pi \cdot d^4}{128\eta \cdot \ell} \Delta p, \text{ м}^3/\text{с}$$

где R – радиус трубопровода, м; d – диаметр трубопровода, м;  $\Delta p = p_1 - p_2$  – перепад давлений в трубе, Па;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с;  $\ell$  – длина трубы, м.

Закон Пуазейля справедлив только для ламинарного течения и при условии, что длина трубы превышает длину начального участка, необходимую для развития ламинарного течения в трубе. Такие условия в реальных системах охлаждения ДВС практически не встречаются, поэтому гораздо больший интерес представляет случай турбулентного течения жидкости. Заданные параметры математической модели обеспечивают режим развитого турбулентного течения в трубе:

$$Re = \frac{w \cdot d_{\text{эф}}}{\nu} = \frac{1,0 \cdot 0,02}{0,366} \cdot 10^6 = 54645$$

Одной из наиболее существенных характеристик турбулентного потока является турбулентная вязкость. Присутствие пульсаций скорости и давлений приводит к изменению вязкости жидкости в потоке. В соответствии с гипотезой Прандтля турбулентная вязкость связана с градиентом осредненной скорости посредством некоторого расстояния, на котором моли рабочей среды, совершающие пульсации, сохраняют осредненные значения температуры, и скорости пульсаций. Линии тока при ламинарном режиме течения формируются вследствие слоистого характера движения жидкости. При этом перенос макрообъемов жидкости из одного слоя в другой определяется молекулярными механизмами, а касательное напряжение  $\tau_e$  вычисляется по формуле Ньютона [18]:

$$\tau_{\varepsilon} = \eta \frac{du}{dy},$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости среды, Па·с;  $\frac{du}{dy}$  – поперечный градиент скорости, с<sup>-1</sup>.

При турбулентном режиме течения возникают дополнительные касательные напряжения, величина которых в соответствии с гипотезой Прандтля определяется равенством:

$$\tau_T = \rho \cdot l^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dy} \right| \cdot \frac{d\bar{u}}{dy},$$

где  $\bar{u}$  – осредненная скорость среды, м/с;  $l$  – длина пути перемешивания, м;  $l = \kappa \cdot y$ ,  $\kappa$  – константа турбулентности (для течений в трубах  $\kappa \cong 0,1$ ),  $y$  – расстояние от стенки канала или обтекаемой поверхности;  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>.

По аналогии с коэффициентом динамической вязкости  $\eta$ , определяемой формулой Ньютона, вводится коэффициент турбулентной вязкости  $\eta_T$ :

$$\eta_T = \rho l^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dy} \right|.$$

При определении напряжений турбулентных течений в условиях проявления молекулярной и турбулентной вязкостей справедливо выражение

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{\varepsilon} + \tau_T = (\eta + \eta_T) \frac{d\bar{u}}{dy}.$$

При турбулентных режимах течения с высокими значениями числа Рейнольдса коэффициент турбулентной вязкости оказывает существенное влияние на величину касательных напряжений в потоке, а, следовательно, и на процессы тепло- и массопереноса. В связи с этим были определены поля коэффициентов турбулентной вязкости при различных давлениях, представленные на рис.4.

При описании процесса теплообмена может быть использована аналогичная модель разложения молекулярного и турбулентного переноса теплоты:

$$q_{\Sigma} = q_{\varepsilon} + q_T = -(\lambda + \lambda_T) \frac{dT}{dy},$$

где  $q_{\Sigma}$ ,  $q_{\varepsilon}$ ,  $q_T$  – удельные тепловые потоки соответственно суммарный, ламинарный, турбулентный;  $\lambda$ ,  $\lambda_T$  – соответственно коэффициенты теплопроводности в ламинарном потоке и коэффициент теплопроводности турбулентного потока.

На режимах развитого турбулентного течения значение коэффициента  $\lambda_T$  существенно превосходит значение коэффициента  $\lambda$  и именно турбулентная теплопроводность определяет интенсивность теплообмена. Поэтому следующим этапом исследований было определение влияния давления на турбулентную теплопроводность.

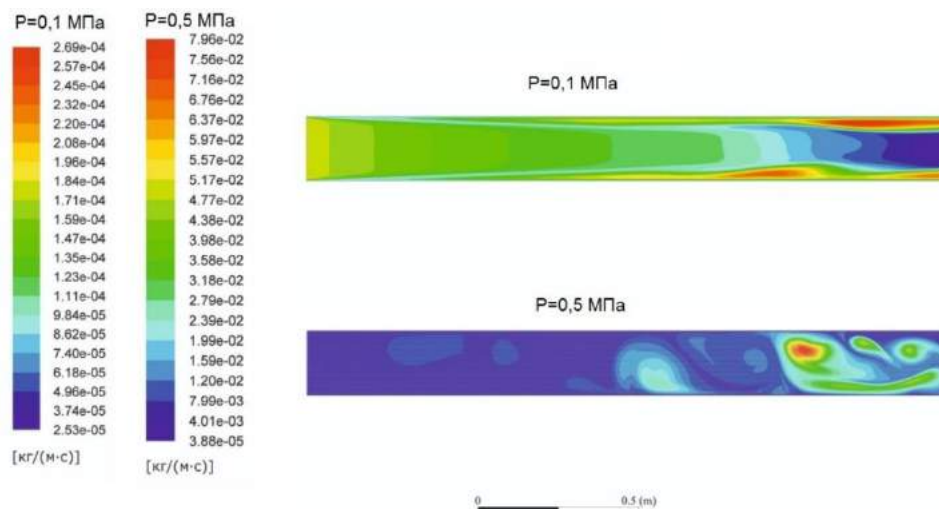


Рис.4. Влияние давления на коэффициент турбулентной вязкости  $\eta_T$

Механизм распространения теплоты в турбулентных потоках жидкости можно представить, как перенос энергии путем упругих колебаний. Такое представление о механизме переноса теплоты в жидкостях, выдвинутое А.С. Предводителевым, было использовано Н.Б. Варгафтиком для описания опытных данных по теплопроводности различных жидкостей. Для большинства жидкостей теория нашла подтверждение и позволила получить формулу коэффициента турбулентной теплопроводности следующего вида [19]:

$$\lambda = A \frac{c_p \cdot \rho^{4/3}}{\mu^{1/3}}, \text{ Вт/(м·К)}$$

где  $A$  – коэффициент пропорциональный скорости распространения упругих волн в жидкости, не зависящий от природы жидкости, но зависящий от температуры, при этом  $A \approx \text{const}$ , м<sup>2</sup>·кг/(с·кмоль);  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – молекулярная масса, кг/кмоль.

Для нормальных и ассоциированных жидкостей была получена обобщенная формула Предводителява-Варгафтика [19]:

$$\lambda = \frac{1}{\alpha} \cdot A_0 \cdot c_p \cdot \rho^{4/3} \cdot \mu^{1/3},$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий степень ассоциации жидкостей (для неассоциированных

жидкостей  $\alpha = 1$ );  $A_0 = 1,54$  – универсальная величина для всех жидкостей при  $T = 0,5T_{кр}$ .

В работе [20] показано, что для жидкостей справедливо равенство:

$$A_0 \cdot c_p \cdot \mu^{-1/3} = B,$$

$B$  – величина постоянная, не зависящая от температуры жидкости.

Это позволяет записать выражение теплопроводности неассоциированных жидкостей в виде:

$$\lambda = B \cdot \rho^{4/3}, \text{ Вт/(м·К)}.$$

Полученное уравнение позволяет определить зависимость  $\lambda$  от температуры, если известна зависимость  $\rho = f(t)$ , однако в двухфазном потоке эта зависимость является нелинейной, поэтому определение теплопроводности турбулентного потока осуществлялось методами численного моделирования.

Результаты численного моделирования представлены на рис.5.

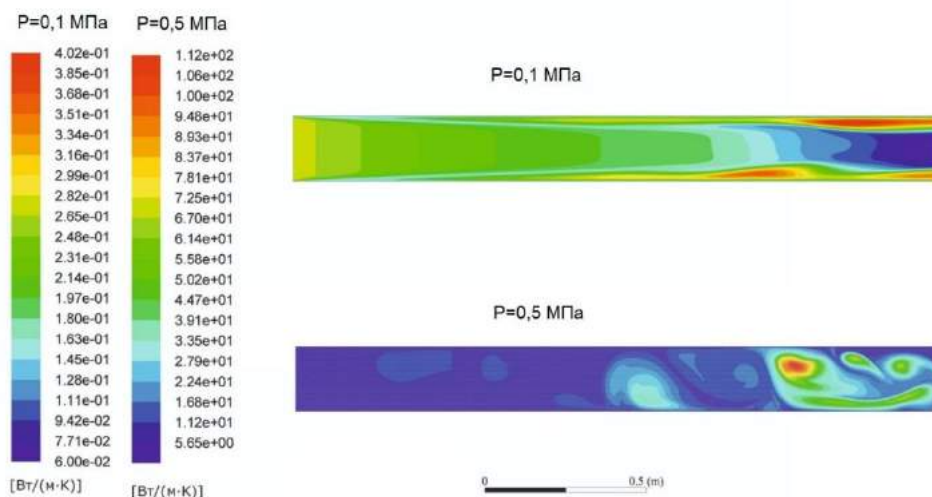


Рис.5. Влияние давления на коэффициент теплопроводности потока при турбулентном режиме течения

Для двухфазных потоков важное значение имеет изменение энтальпии в процессе теплообмена. Так как энтальпия двухфазного потока представляет собой энергию, которая может быть преобразования в теплоту при некотором постоянном давлении, то ее увеличение с повышением давления благоприятно сказывается на теплопередающих характеристиках потока. В случае вынужденного движения двухфазной жидкости по трубе энтальпия является показателем способности образовавшихся пузырьков переносить максимальное количество тепла в остальной объем. Результаты моделирования изменения удельной энтальпии при различных значениях давления представлены на рис.6.

При давлении 0,1 МПа увеличение удельной энтальпии более  $1,6 \cdot 10^5$  Дж/кг приводит к появлению первых признаков поверхностного кипения (рис.3) в зоне I. При дальнейшем движении жидкости и повышении температуры, энтальпия незначительно повышается (до  $1,63 \cdot 10^5$  Дж/кг на выходе из трубы). Образование пузырьков в зонах I и II в этом случае не происходит из-за недогрева жидкости до температуры кипения  $T_{кип}$ . Повышение энтальпии,

равно, как и теплопроводности начинается только в зоне III (эмульсионная зона), в которой начинается образовываться поверхностная пленка пристеночного кипения, приводящая к эрозионным разрушениям теплоотдающей поверхности. В этом случае значение энтальпии является показателем способности образовавшихся пузырьков переносить максимальное количество тепла в остальной объем жидкости.

Повышение давления в трубе в 5 раз приводит к резкому повышению энтальпии (до  $3,19 \cdot 10^5$  кДж/кг), при этом ее значение остается практически постоянным во всей пристеночной области потока. При 0,5 МПа в первых двух зонах жидкость также недогрета до температуры кипения  $T_{кип}$ , но за счет повышения энтальпии в 2 раза (по сравнению с потоком при 0,1 МПа), в зоне недогретой жидкости и в зоне поверхностного кипения повышается теплопроводность более чем в 5 раз. Эта особенность потока позволяет избежать начала эмульсионного режима, нежелательного с точки зрения ресурса охлаждаемых деталей, практически на всем протяжении потока.



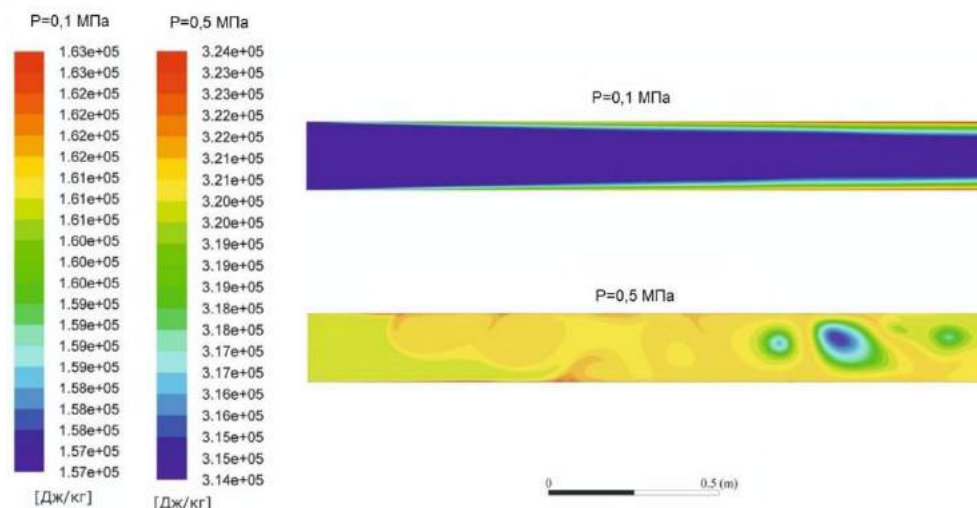


Рис. 6. Влияние давления на значение удельной энтальпии потока жидкости

**Заключение**

1. В результате проведенных исследований создана математическая модель, адекватно описывающая процессы тепло- и массопереноса в двухфазном турбулентном потоке в горизонтальной гладкой трубе.

2. Результаты численного моделирования процессов тепло- и массопереноса, выполненное с использованием лицензионного программного продукта ANSYS, показали, что статическое давление в жидкости оказывает существенное влияние на структуру двухфазного потока. Увеличение давления в диапазоне, характерном для высокотемпературных систем охлаждения приводит к повышению коэффициента турбулентной вязкости более чем в 30 раз; осредненная теплопроводность потока при повышении давления от 0,1 до 0,5 МПа возрастает более чем в 15 раз; энтальпия потока при тех же условиях возрастает примерно в два раза.

3. Полученные результаты численного моделирования показали, что высокотемпературное охлаждение наряду с улучшением экономических показателей, доказанным ранее проведенными

исследованиями и опубликованными результатами, обеспечивает повышение ресурсных показателей ДВС за счет предотвращения режимов поверхностного кипения на охлаждаемых поверхностях, и снижения вследствие этого эрозионно-коррозионных разрушений деталей.

4. На основании полученных результатов могут быть получены аналитические зависимости показателей теплопереноса от давления с целью рационального выбора параметров охлаждения форсированных ДВС с учетом технической возможности и экономической целесообразности повышения давления в системе охлаждения судовых ДВС.

5. Результаты проведенного численного моделирования целесообразно использовать при дальнейших исследованиях процессов теплообмена в системах высокотемпературного охлаждения судовых ДВС, а также при оценке возможности и целесообразности использования в таких системах альтернативных охлаждающих жидкостей с особыми теплофизическими свойствами.

**Благодарности**

За предоставленную возможность использования лицензионного программного пакета ANSYS для проведения численного эксперимента выражается благодарность ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет».

**Литература**

1. Конкс Г.А., Лашко В.А. Мировое судовое дизелестроение. Концепция конструирования, анализ международного опыта. – М.: Машиностроение, 2005. – 512 с.
2. Безюков О.К., Жуков В.А. Состояние и перспективы судового двигателестроения в России // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2017. – №2. – С. 40-53.
3. Григорьев М.А., Долецкий В.А. Обеспечение надежности двигателей. – М.: Машиностроение, 1990. – 322 с.
4. Безюков О.К., Жуков В.А., Тимофеев В.Н. Охлаждение транспортных двигателей внутреннего сгорания. – СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2015. – 272 с.
5. Петриченко Р.М. Системы жидкостного охлаждения быстроходных двигателей внутреннего сгорания. – Л.: Машиностроение, 1975. – 224 с.
6. Якубович А.И., Кухаренко Г.М., Тарасенко В.Е. Системы охлаждения тракторных и автомобильных двигателей. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2014. – 473 с.
7. Разуваев А.В. Поршневые двигатели внутреннего сгорания с высокотемпературным охлаждением. – Саратов: Сарат. гос.техн. ун-т, 2001. – 128 с.

8. Ливенцев Ф.Л. Высокотемпературное охлаждение поршневых двигателей внутреннего сгорания. М. – Л.: Машиностроение, 1964. – 204 с.
9. Жуков В.А. Расчетная оценка эффективности высокотемпературного охлаждения комбинированных ДВС // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – №10(87). – С.153-158.
10. Денисенко И.П., Устинов Н.А., Вандышева А.А., Губатенко М.С. О возможности применения высокотемпературного охлаждения в современных поршневых двигателях внутреннего сгорания // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №2 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/65TVN217>.
11. Разуваев А.В., Соколова Е. А., Разуваева Е.А. Повышение эффективности энергетических установок // Вестник Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. – 2010. – Т.3. – №1(46). – С.150-159.
12. Теплотехника. Практикум / Под ред. В.Л. Ерофеева, А.С.Пряхина. – М.: Изд-во Юрайт, 2017. – 395 с.
13. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. Ansys для инженеров. Справочное пособие. – М: Машиностроение, 2004. – 512 с.
14. Ерофеев В.Л., Пряхин А.С., Семенов П.Д. Теплотехника в 2 т. Том 1. Термодинамика и теория теплообмена. – М.: Изд-во Юрайт, 2016. – 308 с.
15. Исаченко В.П., Осипова В.П., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Курс, 2015. – 423 с.
16. Безюков О.К., Жуков В.А. Охлаждающие жидкости транспортных ДВС. – СПб.: СПГУВК, 2009. – 263 с.
17. Sutura S.P., Skalak R. The history of Poiseuille's law // Annual review of fluid mechanics. – 1993. – Т.25. – С.1-19.
18. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
19. Танганов Б.Б., Бубеева И. А., Багаева Т. В. Разработка теоретической модели оценки коэффициента теплопроводности в рамках плазмopodobной концепции растворов электролитов. – М.: Изд. дом Акад. Естествознания, 2014. – 89 с.
20. Филиппов Л.П. Явления переноса. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 120 с.

#### References

1. Konks G.A., Lashko V.A. Mirovoye sudovoye dizelestroyeniye. Kontseptsiya konstruirovaniya, analiz mezhdunarodnogo opyta. M.: Mashinostroyeniye, 2005. 512 s. (In Russian)
2. Bezyukov O.K., Zhukov V.A. Sostoyaniye i perspektivy sudovogo dvigatelestroyeniya v Rossii. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya. 2017. N2. S. 40-53. (In Russian)
3. Grigor'yev M.A., Doletskiy V.A. Obespecheniye nadezhnosti dvigateley. M.: Mashinostroyeniye, 1990. 322 s. (In Russian)
4. Bezyukov O.K., Zhukov V.A., Timofeyev V.N. Okhlazhdeniye transportnykh dvigateley vnutrennego sgoraniya. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2015. 272 s. (In Russian)
5. Petrichenko R.M. Sistemy zhidkostnogo okhlazhdeniya bystrokhodnykh dvigateley vnutrennego sgoraniya. L.: Mashinostroyeniye, 1975. 224 s. (In Russian)
6. Yakubovich A.I., Kukharenek G.M., Tarasenko V.Ye. Sistemy okhlazhdeniya traktornykh i avtomobil'nykh dvigateley. Minsk: Novoye znaniye; M.: INFRA-M, 2014. 473 s. (In Russian)
7. Razuvayev A.V. Porshnevyye dvigateli vnutrennego sgoraniya s vysokotemperaturnym okhlazhdeniyem. Saratov: Sarat. gos.tekhn. un-t, 2001. 128 s. (In Russian)
8. Liventsev F.L. Vysokotemperaturnoye okhlazhdeniye porshnevnykh dvigateley vnutrennego sgoraniya. M. L.: Mashinostroyeniye, 1964. 204 s. (In Russian)
9. Zhukov V.A. Raschetnaya otsenka effektivnosti vysokotemperaturnogo okhlazhdeniya kombinirovannykh DVS. Aviatcionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. 2011. N10(87). S.153-158. (In Russian)
10. Denisenko I.P., Ustinov N.A., Vandysheva A.A., Gubatenko M.S. O vozmozhnosti primeneniya vysokotemperaturnogo okhlazhdeniya v sovremennykh porshnevnykh dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya. Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIYE» T.9, N2 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/65TVN21>. (In Russian)
11. Razuvayev A.V., Sokolova Ye. A., Razuvayeva Ye.A. Povysheniye effektivnosti energeticheskikh ustanovok. Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni Gagarina YU.A. 2010. T.3. N1(46). S.150-159. (In Russian)
12. Teplotekhnika. Praktikum. Pod red. V.L. Yerofeyeva, A.S.Pryakhina. M.: Izd-vo Yurayt, 2017. 395 s. (In Russian)
13. Chigarev A.V., Kravchuk A.S., Smalyuk A.F. Ansys dlya inzhenerov. Spravochnoye posobiye. M: Mashinostroyeniye, 2004. 512 s. (In Russian)
14. Yerofeyev V.L., Pryakhin A.S., Semenov P.D. Teplotekhnika v 2 t. T.1. Termodinamika i teoriya teploobmena. M.: Izd-vo Yurayt, 2016. 308 s. (In Russian)
15. Isachenko V.P., Osipova V.P., Sukomel A.S. Teploperedacha. M.: Kurs, 2015. 423 s. (In Russian)
16. Bezyukov O.K., Zhukov V.A. Okhlazhdayushchiye zhidkosti transportnykh DVS. SPb.: SPGUVK, 2009. 263 s. (In Russian)
17. S.P. Sutura, R. Skalak, The history of Poiseuille's law. Annual review of fluid mechanics. 1993. Vol. 25. P.1-19.
18. Loityanskiy L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza. M.: Nauka, 1978. 736 s. (In Russian)
19. Tanganov B.B., Bubeyeva I. A., Bagayeva T. V. Razrabotka teoreticheskoy modeli otsenki koeffitsiyenta teploprovodnosti v ramkakh plazmopodobnoy kontseptsii rastvorov elektrolitov. M.: Izd. dom Akad. Yestestvoznaniya, 2014. 89 s. (In Russian)
20. Filippov L.P. Yavleniya perenosa. M.: Izd-vo MGU, 1986. 120 s. (In Russian)

УДК 621.311

## ЗАЩИТА ОТ ВОЗГОРАНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ МЕЖДУВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ

**Александр Алексеевич Воршевский**

доктор технических наук, профессор  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: elemcom@smtu.ru

**Вячеслав Юрьевич Клинецвич**

Генеральный директор ООО «НПК «Энергодвижение»  
196158, Россия, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, дом 23, корп. 2, лит. А  
e-mail: v.klintsevich@pmmotor.ru

**Александр Сергеевич Корнев**

доктор технических наук, профессор  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: alex\_kornev46@mail.ru

**Валерий Михайлович Михайлов**

Генеральный конструктор ООО «НПК «Энергодвижение»  
196158, Россия, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, дом 23, корп. 2, лит. А  
e-mail: V.Mikhailov@pmmotor.ru

**Алексей Петрович Сеньков**

доктор технических наук, профессор  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: senkov@smtu.ru

### Аннотация

На судах и кораблях в основном применяются асинхронные машины и синхронные машины с обмоткой возбуждения. Вентильные электродвигатели с постоянными магнитами на роторе (ВДПМ) имеют более высокий КПД при меньших массе и габаритах, но на судах и кораблях применяются редко, так как возможно возгорание вентильной машины при возникновении междувиткового замыкания в обмотке статора. Магнитное поле ротора, созданное постоянными магнитами, при замыкании в обмотке статора на ходу машины создаст ЭДС и ток в контуре, образованном междувитковым замыканием, который может вызвать пожар. Размещение ВДПМ в герметизированном корпусе не исключает полностью возможность возгорания машины. Исключить возгорание ВДПМ можно, только «погасив» магнитное поле ротора. В статье рассмотрена конструкция ВДПМ, позволяющая в аварийной ситуации «погасить» магнитное поле ротора. Для этого постоянные магниты размещаются в блоках магнитов цилиндрической формы, поворотом которых можно снизить индукцию магнитного поля в рабочем зазоре машины в десятки раз, и исключить возгорание ВДПМ.

**Ключевые слова** вентильные электродвигатели с постоянными магнитами на роторе, междувитковое замыкание, защита от возгорания, гашение магнитного поля.

## PROTECTION AGAINST CATCHING FIRE OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS (PMSM) DURING TURN-TO-TURN FAULTS

**Alexander A. Vorshevskiy**

Dr.Sci.Tech, professor  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: elemcom@smtu.ru

**Vyacheslav Y. Klintsevich**

General Director of "NPK "Energodvizhenie" LLC  
196158, Russia, St. Petersburg, Moscovskoye shosse, 23, building . 2, lit. A  
e-mail: v.klintsevich@pmmotor.ru

**Alexander Sergeevich Kornev**

Dr.Sci.Tech, professor  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: alex\_kornev46@mail.ru



**Valery M. Mikhailov**

General Designer of "NPK "Energodvizhenie" LLC  
196158, Russia, St. Petersburg, Moscovskoye shosse, 23, building . 2, lit. A  
e-mail: V.Mikhailov@pmmotor.ru

**Alexey P. Senkov**

Dr.Sci.Tech, professor  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: senkov@smtu.ru

### Abstract

Asynchronous and synchronous machines with excitation winding are mainly used on vessels and ships. PMSM have a higher efficiency with lower mass and dimensions, but are rarely used on vessels and ships, since it is possible that the PMSM may catch fire if a turn-to-turn fault occurs in the stator winding. The magnetic field of the rotor, produced by permanent magnets, when short-circuited in the stator winding on the run of the machine will produce an EMF, and a current in the circuit formed by the turn-to-turn fault, which can cause a fire. Placing a PMSM in a sealed enclosure does not completely exclude the possibility of catching fire by a device. It is possible to exclude catching fire of PMSM only by "suppressing" the magnetic field of the rotor. The article describes the design of a PMSM, which allows in an emergency situation suppressing the magnetic field of the rotor. For that end, permanent magnets are placed in blocks of magnets of cylindrical shape, the rotation of which can reduce the induction of the magnetic field in the working gap of the machine in dozens of times, and exclude catching fire by PMSM.

**Keywords** Permanent Magnet Synchronous Motors, turn-to-turn fault, protection against fire, suppressing the magnetic field .

### Введение

Управляемые электроприводы с вентильными электродвигателями с постоянными магнитами на роторе (ВДПМ) имеют высокий КПД и минимальные массы и габариты. В кратковременных режимах ВДПМ способны создать на выходном валу момент существенно более высокий, чем электродвигатели других видов при одинаковых габаритах [1, с.9], поскольку ВДПМ допускают линейную нагрузку значительно выше. Благодаря этим качествам, ВДПМ широко применяются в электротехнических системах автономных объектов: в космической технике, в авиации и электромобилях.

На судах и кораблях ВДПМ нашли применение в гребных электрических установках (ГЭУ). Фирма АВВ разработала ГЭУ Compact Azipod и Azipod@CZ [2] с ВДПМ мощностью до 4,5 МВт. Известно также применение ВДПМ PERMASYN в ГЭУ подводной лодки U 212A [3]. Прорабатывается возможность применения на судах генераторов с постоянными магнитами на роторе в сочетании с высокооборотной турбиной [4], что позволит значительно снизить массогабаритные характеристики агрегата судовой электростанции.

Однако на судах в основном применяют асинхронные и синхронные машины с обмоткой возбуждения. Более широкому применению ВДПМ в судовых электротехнических системах препятствует пожароопасность этого вида электрических машин. Один из наиболее распространенных видов отказа электрических машин является междувитковое замыкание обмотки статора [5, с. 21]. При возникновении замыкания в обмотке статора гребного двигателя на ходу судна двигатель будет отключен от источника питания системой управления, но судно продолжит движение по инерции и двигатель будет вращаться вместе с гребным винтом под действием набегающего потока воды. При вращении постоянные магниты ротора будут создавать ЭДС в обмотке статора и в замкнутом контуре, образованном междувитковым

замыканием, возникнет ток, способный вызвать возгорание машины и пожар на судне. Пожароопасная ситуация может возникнуть и в высокооборотном турбогенераторе при междувитковом замыкании на ходу турбины и вращении затем агрегата электростанции по инерции.

Вероятность возникновения междувитковых замыканий в обмотке статора препятствует также применению ВДПМ в гребных электрических установках с двумя электродвигателями, работающими на один гребной винт. Подобные гребные установки применяются, например, на ледоколах. При замыкании в обмотке статора одного из двигателей второй, исправный электродвигатель включать нельзя, так как будет вращаться и ротор аварийной машины, и она может загореться. Кроме того, аварийный электродвигатель при вращении будет создавать тормозной момент.

В значительной степени вероятность пожара можно исключить, если разместить ВДПМ в герметизированном объеме, оснащенном средствами пожаротушения. Это существенно увеличивает объем, занимаемый ВДПМ, при этом опасность возгорания машины при нарушении разгерметизации сохраняется.

Опасные последствия при междувитковых замыканиях в обмотке статора ВДПМ обусловлены тем, что магнитное поле ротора, созданное постоянными магнитами, в аварийных ситуациях сохраняется. В асинхронных и синхронных машинах с обмоткой возбуждения отключение обмоток машин при междувитковых замыканиях от источников питания возможность возникновения пожара полностью исключает.

Обмотки вентильных машин, как правило, соединяют «звездой», и разрыв нулевого соединения фаз ключами К при замыкании витков между фазами исключает возникновение токов короткого замыкания (рис. 1а).

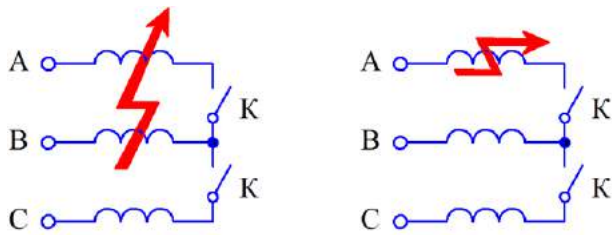


Рис. 1. Варианты междувиткового замыкания ВДПМ.

Однако при замыкании витков одной и той же фазы разрыв нулевого соединения фаз не поможет (рис. 1б). Исключить вероятность возникновения пожара в вентильных машинах при замыканиях в обмотке статора можно только «погасив» магнитное поле ротора.

В [6] приведена конструкция ВМГМ, которая позволяет «погасить» магнитное поле ротора «коллекторного» типа. Ниже будет рассмотрена схема вентильной машины [7], в которой конструктивными средствами можно «погасить» магнитное поле ротора любой конструкции (рисунок 2).

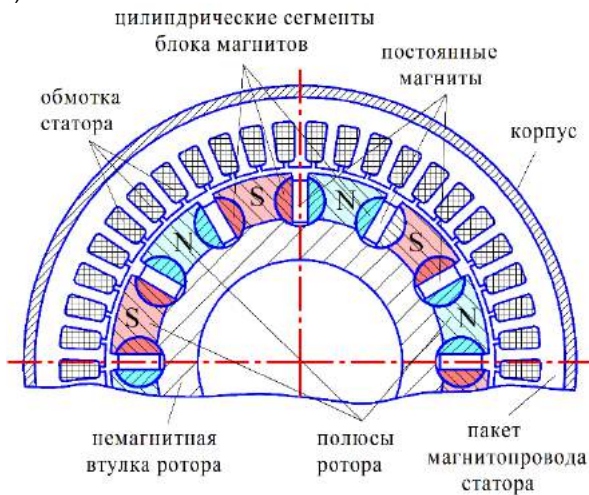


Рис. 2. Схема конструкции ВДПМ.

Основой ротора является немагнитная втулка. На наружной поверхности втулки установлены полюсы из магнитной стали. Полюсы разделены пазами, и между полюсами выполнены сквозные цилиндрические отверстия, в которые вставляются блоки магнитов цилиндрической формы [8]. Снаружи каждый блок магнитов охватывает тонкостенная оболочка из немагнитного материала. Внутри оболочки с боковых сторон располагаются цилиндрические сегменты из магнитной стали, а между ними размещаются постоянные магниты в форме прямоугольных призм. По торцам блоки магнитов закрыты круглыми крышками из немагнитных материалов. Направления намагничивания постоянных магнитов – перпендикулярное к плоскостям цилиндрических сегментов, и сегменты в одном и том же блоке намагничиваются с разной полярностью. Блоки магнитов могут поворачиваться в цилиндрических отверстиях ротора. В нормальном состоянии машины блоки магнитов устанавливаются так, чтобы они были обращены к соседним блокам цилиндрическими сегментами одинаковой полярности, как показано на рисунке 2. В результате

полярность полюсов ротора будет чередоваться в тангенциальном направлении.

На рисунке 3а показана структура магнитного поля ВДПМ при обесточенной обмотке статора, созданного постоянными магнитами ротора, полученная на модели машины по рисунку 2 в пакете Elcut.

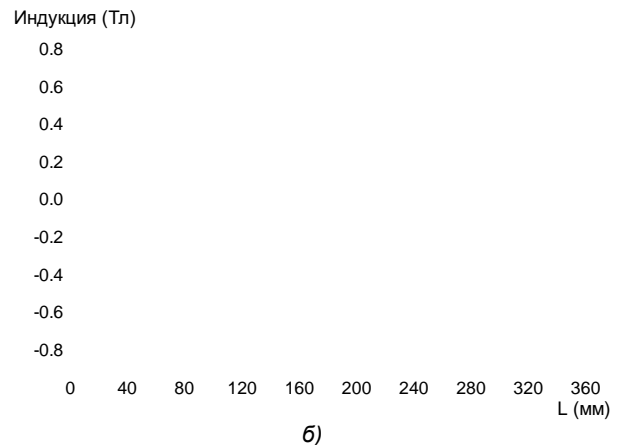
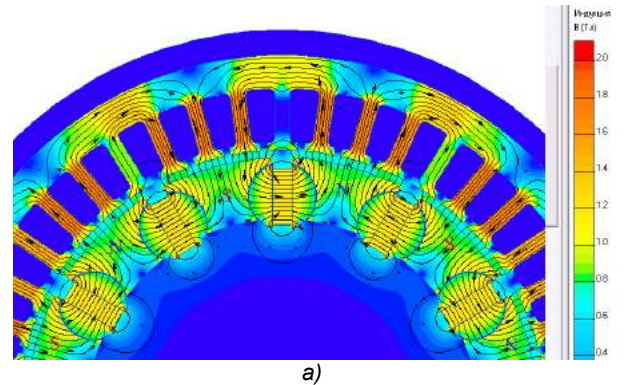


Рис. 3. Структура магнитного поля ротора и индукция магнитного поля в зазоре ВДПМ в нормальном состоянии машины

На рисунке 3б показано распределение радиальной составляющей индукции магнитного поля в воздушном зазоре. Как видно из структуры магнитного поля и распределения индукции в зазоре, машина находится в нормальном состоянии.

С одной из торцевых сторон ротора на торцевые крышки половины блоков магнитов (через один) прикреплены зубчатые колеса, которые входят в зацепление с ведущим зубчатым колесом (рисунок 4).

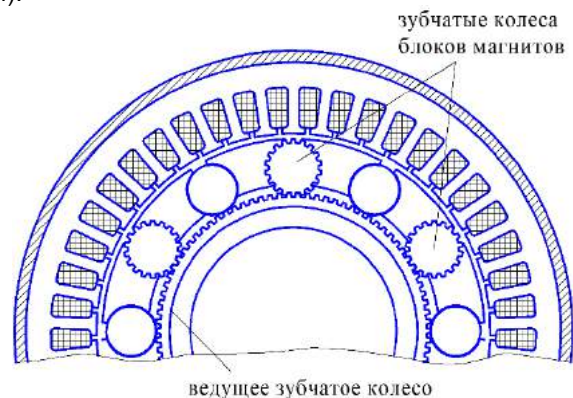


Рис. 4. Устройство поворота блоков магнитов

В устройстве поворота блоков магнитов ведущее зубчатое колесо приводится во вращение специальным приводом, который на рисунке 4 не показан, установленным на подшипниковом щите машины. В случае возникновения междувиткового замыкания в обмотке статора, привод развернет ведущее зубчатое колесо на такой угол, при котором блоки магнитов, связанные зубчатым зацеплением с ведущим зубчатым колесом, развернутся на 180°. В таком положении соседние блоки магнитов будут обращены друг к другу цилиндрическими сегментами разной полярности. На рисунке 5 показана структура магнитного поля машины и индукция магнитного поля в воздушном зазоре после разворота половина блоков магнитов на 180°, полученная при моделировании.

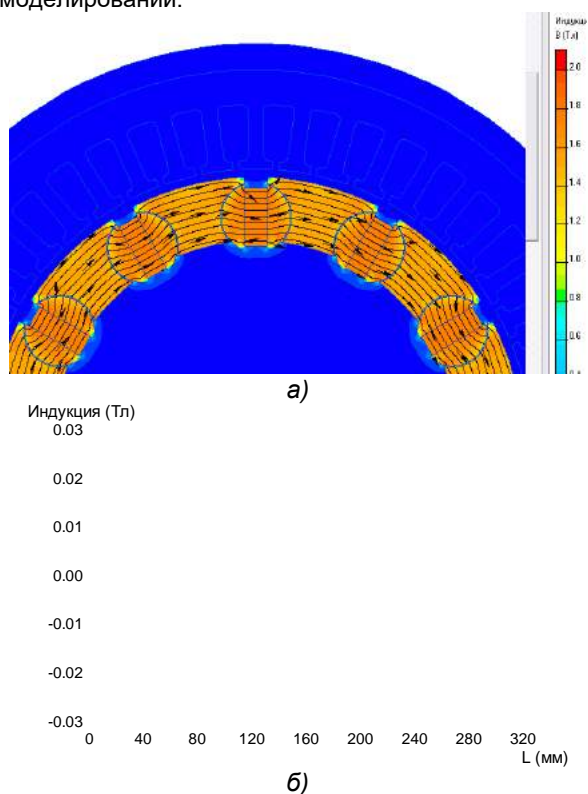


Рис. 5. Структура магнитного поля ротора и индукция магнитного поля в зазоре ВДПМ в аварийном состоянии машины

Как показали результаты моделирования магнитной системы машины в аварийном состоянии, индукция магнитного поля в воздушном зазоре после поворота блоков магнитов снизилась в десятки раз. Соответственно, снизится ЭДС в обмотке статора, и опасность возникновения пожара будет исключена. Возврат блоков магнитов из аварийного в рабочее состояние машины можно осуществить с помощью электропривода, вращающего ведущее зубчатое колесо. В [] показано также, что предложенный способ «гашения» поля ВДПМ можно применить и к ротору типа «звездочка» и к ротору с комбинированной магнитной системой.

Можно также отметить, что поворотом части блоков магнитов можно не только «гасить» магнитное поле ротора, но также и регулировать индукцию магнитного поля ротора для расширения диапазона регулирования частот ВДПМ и повышения КПД машины в частичных режимах работы.

**Выводы**

1. В конструкции ВДПМ, в которой предусмотрена возможность «гашения» магнитного поля ротора при междувитковом замыкании в обмотке статора, постоянные магниты ротора в форме прямоугольных призм размещаются в центральной части блоков цилиндрической формы, боковые сегменты которых выполнены из магнитной стали.
2. В нормальном состоянии машины соседние блоки магнитов обращены друг к другу сегментами одинаковой полярности. Для «гашения» поля ротора половина блоков магнитов разворачивается специальным электроприводом так, чтобы соседние блоки магнитов были обращены друг к другу сегментами разной полярности. После разворота блоков магнитов в аварийное состояние индукция магнитного поля в рабочем зазоре машины будет близка к нулю, и возгорание машины произойти не может.

**Литература**

1. Демагин А.В. Электрические машины для непосредственного привода приборных систем / СПб, Издание НПО «Азимут», 1991, 80 с.
2. Azipod® C, Propulsion and thruster units for 1300 – 4500 kW. URL: [http://web.archive.org/web/20140224203045/http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/3fcd7b9606275fe5c1257a3300279df1/\\$file/azipod\\_c\\_presentation.pdf](http://web.archive.org/web/20140224203045/http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/3fcd7b9606275fe5c1257a3300279df1/$file/azipod_c_presentation.pdf) (дата обращения – 03 февраля 2019 г.).
3. Sinavy-dc-Prop-and-Sinavy-PERMASYN. URL: <https://www.siemens.com/content/dam/webassetpool/mam/tag-siemens-com/smdb/events/smm2018/sinavy/sinavy-dc-prop-and-sinavy-permasyn.pdf> (дата обращения – 03 февраля 2019 г.).
4. ООО «НПК Энергодвижение», официальный сайт URL: <http://pmmotor.ru/> (дата обращения – 03 февраля 2019 г.).
5. Справочник по электрическим машинам / под ред. Копылова И.П. и Клокова Б.К. Т. 1 – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
6. Михайлов В.М., Сеньков А.П. Применение вентильных электрических машин в судовых электротехнических системах // Электротехника. 2017. № 12. С. 45-48.
7. Патент на изобретение РФ №2664557, Способ защиты от возгорания электрической машины с постоянными магнитами на роторе цилиндрического типа, снижения потерь и повышения экономичности

при работе на частичных режимах двигателя / Михайлов В.М., Клинецвич В.Ю., Шиловская С.В., Сеньков А.П., 2018, БИ №24.

8. Патент на изобретение РФ №2665673, Блок магнитов / Михайлов В.М., Клинецвич В.Ю., Шиловская С.В., Сергеев Н.Е., Сеньков А.П., 2018, БИ №25.

#### References

1. Demagin A.V.. Electric machines for direct drive of instrument systems. SPb, NGO «Azimut», 1991, 80 p.
2. Azipod® C, Propulsion and thruster units for 1300 – 4500 kW. URL: [http://web.archive.org/web/20140224203045/http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/3fcd7b9606275fe5c1257a3300279df1/\\$file/azipod\\_c\\_presentation.pdf](http://web.archive.org/web/20140224203045/http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/3fcd7b9606275fe5c1257a3300279df1/$file/azipod_c_presentation.pdf).
3. Sinavy-dc-Prop-and-Sinavy-PERMASYN. URL: <https://www.siemens.com/content/dam/webassetpool/mam/tag-siemens-com/smdb/events/smm2018/sinavy/sinavy-dc-prop-and-sinavy-permasyn.pdf>.
4. NPK «Energy Movement» LLC, URL: <http://pmmotor.ru/>
5. Handbook of electric cars / ed. Kopylova I.P. and Klokova B.K. Т. 1 - М.: Energoatomizdat, 1988. - 456 p.
6. Mikhailov V.M., Sen'kov A.P. The use of valve electrical machines in ship electrical systems // Electrical Engineering. 2017. No. 12. P. 45-48.
7. Patent for the invention of the Russian Federation No. 2644557, Method of protection against ignition of an electric machine with permanent magnets on a cylindrical rotor, reducing losses and improving efficiency when working on partial engine conditions / Mikhailov VM, Klintsevich V.Yu., Shilovskaya SV, Senkov, AP, 2018, BI No. 24.
8. Patent for the invention of the Russian Federation No. 2665673, Magnets Block / Mikhailov V.M., Klintsevich V.Yu., Shilovskaya S.V., Sergeev NE, Senkov A.P., 2018, BI No. 25.

УДК 629.5.03

## ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ УЧЕНЫХ СПБГМТУ В ОБЛАСТИ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ

### **Валерий Викторович Медведев**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

### **Борис Александрович Тихомиров**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры судовых турбин и турбинных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: b\_tikhomirov@mail.ru

### **Игорь Михайлович Калинин**

доктор технических наук, доцент,  
начальник отдела перспективного развития предприятия и инновационных разработок  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»  
196158, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44  
e-mail: kaigmi@mail.ru

### **Юрий Александрович Губанов**

доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник  
АО «Научно-производственное объединение "Аврора"» (Санкт-Петербург)  
194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 15  
e-mail: gubanov.electro21@gmail.com

### **Аннотация**

В статье представлены темы и результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, опубликованных в монографиях и учебных изданиях, соавторами которых являются ученые Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (по материалам публикаций членов диссертационного совета Д212.228.03). Работы, выполненные в области судовых энергетических установок (СЭУ) и их элементов и электротехнических комплексов и систем, касаются вопросов проектирования и эксплуатации СЭУ, исследования гидродинамики и теплообмена, совершенствования рабочего процесса в двигателях внутреннего сгорания, обеспечения повышения надежности и безопасности СЭУ, улучшения вибро-акустической обстановки в судовых помещениях, технического диагностирования и прогнозирования технического состояния оборудования, исследования полупроводниковых преобразователей с импульсно-модуляционным управлением, анализа энергетических процессов в электрических цепях с несинусоидальными режимами, гребных электрических установок, электромагнитной совместимости судового электротехнического и электронного оборудования.

**Ключевые слова:** обзор, анализ, судовые энергетические установки, судовые двигатели внутреннего сгорания, топливные элементы, электрохимические генераторы, надежность, безопасность, диагностика, гребные электрические установки.

## RESEARCH AND DEVELOPMENT OF SCIENTISTS OF SPBGMTU IN THE FIELD OF SHIP AND POWER PLANTS AND ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

### **Valery V. Medvedev**

Dr. Sci. Tech., associate professor, professor of department of marine combustion engine and diesel plant  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

### **Boris A. Tikhomirov**

Dr. Sci. Tech., professor, professor of the department of marine turbines and turbine units  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: b\_tikhomirov@mail.ru

**Igor M. Kalinin**

Dr. Sci. Tech., associate professor, Head of the Enterprise Development and Innovation Development Department  
Krylov State Research Centre  
Moskovskoe shosse, 44, St. Petersburg, 196158, Russian Federation  
e-mail: kaigmi@mail.ru

**Yuri A. Gubanov**

Dr. Sci. Tech., professor, Chief Researcher  
JSC "Scientific and Production Association" Aurora "" (St. Petersburg)  
Karbysheva, 15, St. Petersburg 194021, Russian Federation  
e-mail: gubanov.electro21@gmail.com

**Abstract**

The article presents the themes and results of research and development works published in monographs and educational publications, co-authored by scientists of St. Petersburg State Marine Technical University (based on publications of members of the dissertation council D212.228.03). The works carried out in the field of ship power plants (SPP) and their elements and electrical complexes and systems deal with the design and operation of an SPP, research of hydrodynamics and heat exchange, improvement of the working process in internal combustion engines and turbines, ensuring improved reliability and safety of the SPP, acoustic conditions in the ship's premises, technical diagnostics and forecasting of the equipment's technical condition, semiconductor conversion studies with pulse-modulation control, analysis of energy processes in electric circuits with non-sinusoidal modes, propeller electrical equipment, electromagnetic compatibility shipboard electrical and electronic equipment.

**Key words:** review, analysis, ship power plants, ship internal combustion engines, fuel cells, electrochemical generators, reliability, safety, diagnostics, rowing electrical installations.

**Введение**

Известно, что проведение научных исследований сопровождается публикациями результатов. Обобщение и систематизация полученных достижений, обычно, излагаются в научных монографиях и учебных изданиях. В данной статье представлены актуальные темы научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, нашедшие отражение в публикациях членов диссертационного совета Д212.228.03 СПбГМТУ.

**1. Исследования в области судовых энергетических установок**

**Общие вопросы проектирования и эксплуатации судовых энергетических установок (СЭУ) и их элементов,** касаются самых разнообразных аспектов. В учебнике [1] приведены общие сведения об устройстве судовых дизельных энергетических установок, их отдельных элементов, дан анализ режимов их работы. Изложены основы выбора типа, мощности главных и вспомогательных двигателей, передач и вспомогательных энергетических установок. Даны рекомендации по размещению главных и вспомогательных механизмов. Большое внимание уделено проектированию и расчетам валопроводов судовых энергетических установок и, в частности, расчетам изгибных, крутильных и осевых колебаний. Описаны мероприятия по борьбе с шумом и вибрацией судовых механизмов, а также другие аспекты эксплуатации энергетических установок, связанные с воздействием на окружающую среду. Освещены вопросы, связанные с автоматизацией и оценкой качества дизельных энергетических установок.

Сюда следует отнести актуальную тему воздействия энергетики на окружающую среду и климат. Краткое обобщение работ, выполненных в СПбГМТУ и других отечественных и зарубежных организациях за период с 1973 по 2002 гг. представлены в [2]. В работе также описаны некоторые возможные сценарии развития событий до 2100 г.

Рассмотрение проблем, возникающих в процессе разработки, создания и эксплуатации транспортных энергоустановок с водородным топливом выполнено в работах [3, 4]. Вопросы производства, хранения, подачи водорода и кислорода в энергетических установках, экономические показатели таких установок и многие другие проблемы нашли отражение в этих трудах. Особенностью работы [4] является рассмотрение возможных вариантов берегового заправочного комплекса. Указанная выше тематика нашла отражение и в работах [5, 6].

В [7] рассмотрены ядерные энергетические установки различных судов: ледоколов, надводных и подводных кораблей и плавучих теплоэлектростанций, единственного в мире лихтеровоза «Севморпуть». Большое внимание уделено устройству судовых ядерных паропроизводящих и паротурбинных установок. Изложены основы расчета ядерных реакторов, парогенераторов и турбоагрегатов. Обоснована структурная организация систем управления техническими средствами атомных судов, обеспечивающими ядерную безопасность энергетических установок. Развитие этой тематики нашло в работе [8], где приводятся данные редко встречающиеся в отечественной и зарубежной литературе, посвященные тепловым и гидродинамическим процессам в элементах судового оборудования. Рассматриваются оригинальные исследования авторов в этой области.

Вопросы **исследования гидродинамики и теплообмена** в общей постановке и применительно к элементам судовых энергетических установок нашли отражение в ряде работ. Так, анализ теоретических и экспериментальных результатов для установившихся турбулентных течений с общих позиций механики сплошных сред выполнен в [9]. Подробно излагается феноменологическая теория турбулентности на основе обобщения формулы Кармана для турбулентной вязкости. Рассматриваются вопросы замыкания уравнений Рейнольдса и расчета турбулентных пульсаций.



Анализируются пути изучения турбулентных взаимодействий физических полей применительно к решению задач тепло-массообмена и магнитной гидродинамики.

Работа [10] посвящена рассмотрению двух основных вопросов. Во-первых, изложению неклассических вопросов термодинамики, связанных с описанием поведения реальных газов, особенно в тех областях термодинамических параметров, где модель идеального газа уже неприменима. Во-вторых, изучению способов построения термических уравнений состояния для реальных газов. Результаты исследования использованы, например, при разработке методов расчета процессов сжатия реальных газов в компрессорах.

Изложение вопросов, связанных с применением шаровых укладок в теплообменных и технологических устройствах и аппаратах, выполнено в [11]. Особое внимание уделено анализу влияния на гидродинамику и теплообмен геометрических параметров шаровых укладок, как регулярных, так и случайных. На основании проведенных экспериментальных исследований и анализа данных других авторов предложены зависимости для учета воздействия дополнительных факторов: числа рядов в укладке; ограждающих проницаемых поверхностей; градиента потока и температурного фактора.

В [12, 13] рассмотрены вопросы, связанные с применением результатов визуализации течений оптически активной жидкости в каналах теплообменных и технологических устройств и аппаратов. Приведены фотографии картин течения, а в [13] еще и ссылки на ресурсы Internet, содержащие научно-популярные фильмы и анимацию течений. Публикации содержат полезные рекомендации, предостережения и анализ полученных результатов.

Издание [14] посвящено рассмотрению модельного течения жидкости, называемого потенциальным или безвихревым. Рассмотрены вопросы, связанные с разработкой и применением моделей потенциальных течений в каналах теплообменных и технологических устройств и аппаратов различного назначения.

Исследованию теплоотдачи и гидродинамики элементов теплообменного оборудования, интенсифицированных путем нанесения на поверхности теплообмена сферических лунок, посвящена работа [15]. В ней рассмотрены и другие типы поверхностей. Отмечен спектр возможного применения интенсифицирующих поверхностей, как для повышения эффективности теплообменных аппаратов, так и для снижения уровня отложений. Кроме того, в книге показано, как методы CFD (Computational Fluid Dynamics) позволяют упростить поиск оптимальных реализаций указанного типа поверхностей. Приведены сведения о влиянии высоких чисел Прандтля, наличия отложений, двухфазности потоков.

В [16] систематически изложены теоретические основы для постановки задач математического моделирования течений жидкостей и газов. Особое внимание уделено вопросам построения замкнутых систем уравнений для турбулентного режима этих течений. Подробно рассмотрены модели турбулентности, используемые в современных

программных комплексах, например, ANSYS Fluent, NUMECA, CD-adapco StarCD/CCM+, FlowVision, и т.д.

Работа [17] посвящена изложению понятий и законов *технической термодинамики*. Показаны закономерности преобразования теплоты в механическую работу в обратимых циклах тепловых двигателей.

Важнейшими принципами проведения исследований в области рабочего процесса в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) являются, во-первых, комплексный подход в изучении указанных процессов, во-вторых, использование сочетания методов математического и физического моделирования как элементарных процессов, так и их совокупности. **Совершенствованию рабочего процесса в ДВС** посвящены работы [18, 19, 20].

Анализ современного состояния **вспомогательных турбонасосных агрегатов**, приведенный в [21], показал, что повышение их технико-экономических показателей может быть достигнуто разнообразными способами.

Важное место занимают исследования, направленные на **обеспечение повышения надежности и безопасности СЭУ**. Математическим аспектам проектных задач всегда уделяется повышенное внимание. Особую значимость приобретают расчеты при конструировании современных двигателей, обладающих высоким уровнем форсирования, пониженной металлоемкостью и длительным ресурсом. При этом результаты соответствующих расчетов выступают в качестве количественной оценки допустимости конструкторских решений. Расчеты, учитывающие режимы работы ДВС, условия нагружения деталей, свойства материалов, эксплуатационные и другие факторы приведены в [22].

Результаты разработки комплекса методов обеспечения надежности и безопасности СЭУ с учетом влияния случайных факторов на износ, усталостную прочность, тепловое состояние, шум и вибрацию на основных этапах ее проектирования приведены в работах [23, 24, 25]. При этом в [23] основной акцент делался на рассмотрении вопросов, связанных с применением методологии формализованной оценки безопасности (ФОБ – Formal Safety Assessment – FSA). В работе [24], – акцент на результатах научных теоретических и экспериментальных исследований, проводимых в достаточных объемах для определения надежных и обоснованных зависимостей, необходимых при выполнении процесса имитационного моделирования. Монография [25] является логическим обобщением выполненных многолетних исследований.

Превышение санитарной нормы по уровням воздушного шума и вибрации наблюдается практически во всех судовых помещениях, поэтому актуальны работы по **улучшению вибро-акустической обстановки в судовых помещениях**. Реализация основных гигиенических нормативов требует внедрения мероприятий и средств защиты как на стадии проектирования, так и при модернизации существующих судов как во время капитального ремонта, так и в условиях эксплуатации, что в свою очередь требует наличия методов расчетной оценки ожидаемых уровней



физических полей и оценки эффективности внедряемых средств защиты.

В настоящее время известны технические предложения и мероприятия, позволяющие решить или, по крайней мере, снять остроту указанных выше проблем. Примерами таких решений является применение жестких вибропоглощающих покрытий [25] и канатных (тросовых) виброизоляторов [26, 27]. Существует уже достаточно широкий спектр вариантов выполнения виброизоляторов.

СЭУ относится к классу сложных системотехнических комплексов, структура и свойства которой определяются составом комплектующего энергетического оборудования. Эффективную эксплуатацию СЭУ определяет не только конструктивное исполнение и надёжность энергетического оборудования, принятая стратегия технического обслуживания и ремонта, но и система мониторинга текущего технического состояния. Работа [28] посвящена теоретическим и прикладным **вопросам технического диагностирования** механического оборудования транспортных объектов и автоматизированных систем. Рассмотрению **вопросов прогнозирования технического состояния оборудования** на основе использования статистического, экстраполяционного и причинно-следственного методов посвящена работа [29].

## 2. Примеры исследований в области электротехнических комплексов и систем

Результаты **исследования полупроводниковых преобразователей с импульсно-модуляционным управлением** приведены в монографии [30]. В ней представлены результаты анализа и синтеза гармонического состава выходного напряжения ключевого блока и потребляемого тока в преобразователях электрической энергии с широтно-импульсным управлением для задач конвертирования, инвертирования и выпрямления на основе использования аппарата коммутационных функций и полиномов Фурье в замкнутой форме при различных законах управления и видах широтно-импульсной модуляции. Предложен метод анализа переходных и квазиустановившихся режимов работы, а также синтез сглаживающих фильтров в задачах конвертирования и выпрямления на основе

искусственной периодизации выходного напряжения ключевого блока и тока нагрузки не подверженного к накапливающейся погрешности и некритичного к частоте квантования.

**Анализ энергетических процессов в электрических цепях с несинусоидальными режимами** выполнен в работе [31]. В монографии приведены выражения для количественной оценки составляющих полной мощности, удовлетворяющие условию выполнения энергетического баланса. Рассмотрены вопросы декомпозиции несинусоидального тока на его ортогональные составляющие.

Отдельное внимание уделено автоматизированным средствам энергетического анализа, а также вопросам общего подхода к реализации статических устройств компенсации.

В работе [32] представлен материал **по гребным электрическим установкам**: рассмотрены их классификация, технические характеристики, конструктивные параметры, схемы главного тока и особенности применения. На примерах конкретных судов проводится сравнение применяемых на них разных типов гребных установок, отмечаются их достоинства и недостатки.

Проблема **электромагнитной совместимости (ЭМС) судового электротехнического и электронного оборудования** описана в работе [33]. Отсутствие ЭМС приводит к экономическому ущербу, серьезным авариям и даже к гибели людей. В издании рассмотрены способы решения задач ЭМС на основании обеспечения нормальной работы репетиторов помех в реальных условиях эксплуатации, с учетом возможного воздействия помех со стороны источников, и с учетом механизма связи.

## Заключение

Перечисленное выше является только частью исследований и разработок ученых СПбГМТУ в области СЭУ и электротехнических комплексов и систем. Существует достаточно широкий спектр работ, по которым еще нет обобщения результатов на уровне монографий и учебных изданий. Надеемся, что это будет сделано позже.

## Литература

1. Судовые энергетические установки. Судовые дизельные энергетические установки: учебник / В.К. Румб, Г.В. Яковлев, Г.И. Шаров, В.В. Медведев, М.А. Минасян; СПбГМТУ. - СПб., 2007. - 622 с.
2. Шаманов Н.П. Цивилизация, энергетика, климат в XXI веке: монография. – СПб.: СПбГМТУ, 2002, 226 с.
3. Шаманов Н.П. Калмыков А.Н. Электрохимические транспортные энергоустановки с водородным топливом: монография. – СПб.: СПбГМТУ, 2006. – 306 с.
4. Дядик А.Н., Замуков В.В., Дядик В.А. Корабельные воздухознезависимые энергетические установки. – СПб.: Судостроение, 2006. – 424 с.
5. Дядик А.Н. Никифоров Б.В. Использование электрохимических генераторов на кораблях: монография. – СПб.: СПбГМТУ, 2011. – 341 с.
6. Дядик А.Н. Никифоров Б.В. Корабельные энергетические системы. – Новочеркасск: ЛИК, 2012. – 680 с.
7. Дядик А.Н. Сурин С.Н. Энергетика атомных судов. – СПб.: Судостроение, 2014. – 476 с.
8. Дядик А.Н., Федотов П.А. Физические процессы в элементах судового главного оборудования. – СПб.: ОАО "ЦКБ МТ "РУБИН", 2015. – 176 с.
9. Новожилов В.В., Павловский В.А. Установившиеся турбулентные течения несжимаемой жидкости. 2-е издание. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. – 484 с.
10. Павловский В.А. Введение в термодинамику реальных газов. – СПб.: Изд-во Крыловского государственного научного центра, 2013. – 230 с.

11. Деменок С.Л., Медведев В.В., Сивуха С.М. Гидродинамика и теплообмен в шаровых укладках: монография. – СПб.: Страта, 2012. – 192 с.
12. Деменок С.Л., Медведев В.В., Сивуха С.М. Визуализация течения жидкости в каналах: монография. – СПб.: Страта, 2014. – 134 с.
13. Деменок С.Л., Медведев В.В., Сивуха С.М. Визуализация потоков в каналах: монография. – СПб.: Страта, 2018. – 200 с.
14. Деменок С.Л., Высоцкий Л.И., Медведев В.В., Сивуха С.М. Потенциальные течения жидкости в каналах: монография. – СПб.: Страта, 2015. – 106 с.
15. Готовский М.А., Деменок С.Л., Медведев В.В., Сивуха С.М. Теплоотдача и сопротивление каналов с олуенными поверхностями: монография. – СПб.: Страта, 2016. – 210 с.
16. Павловский В.А., Никущенко Д.В. Вычислительная гидродинамика. Теоретические основы: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2018. – 368 с.
17. Дядик А.Н., Кучинский Д.М. Законы технической термодинамики: учебное пособие. – СПб: Изд-во СПбГМТУ. – 160 с.
18. Гаврилов В.В. Судовое главное энергетическое оборудование. Судовые двигатели внутреннего сгорания: учеб. пособие с грифом УМО. – СПб.: СПГУВК, 2011. – 228 с.
19. Гаврилов В.В., Машенко В.Ю. Анализ процесса горения в судовом дизеле по индикаторным диаграммам: учеб. пособие с грифом УМО. – СПб.: СПбГМТУ. – 2015. – 60 с.
20. Гаврилов В.В. Рабочие процессы и динамика судовых двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие с грифом УМО. – СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2016. – 224 с.
21. Шекун Г.Д., Тихомиров Б.А. Повышение эффективности судовых турбокомпрессорных агрегатов. – СПб: Судостроение, 2006. – 227с.
22. Румб В.К., Медведев В.В. Прочность судового оборудования. В 2 ч. Ч. 1. Конструирование и расчеты прочности судовых двигателей внутреннего сгорания: учебник с грифом Мин.обр. и науки. – СПб.: СПбГМТУ, 2006. – 536 с.
23. Медведев В.В. Применение методологии формализованной оценки безопасности при проектировании судовой энергетической установки и ее элементов: монография. – СПб.: Реноме, 2008. – 328 с.
24. Медведев В.В. Применение имитационного моделирования для обеспечения надежности и безопасности судовых энергетических установок: монография. – СПб.: Страта, 2013. – 352 с.
25. Медведев В.В. Обеспечение надежности и безопасности СЭУ имитационным моделированием: монография. – Germany, Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2017. – 269 с.
26. Горшков В.Ф., Минасян М.А. Динамика корабельных энергетических установок и снижение их виброактивности. – СПб., Изд.: ВМА им. Н.Г. Кузнецова. 2000. – 120 с.
27. Минасян М.А., Минасян А.М.А. Амортизация судовых дизельных энергетических установок. – СПб.: СПбГМТУ, 2017. – 360 с.
28. Хруцкий О.В. Техническая диагностика: учебник. – СПб: СПбГМТУ, 2005 – 208 с.
29. Равин А., Хруцкий О. Прогнозирование технического состояния оборудования: монография. – LAP LAMBERT Acadtmic Publishing, 2014. – 141 с.
30. Дмитриев Б.Ф., Лихоманов А.М., Панин С.Ю., Розов А.Ю. Гармонический анализ и синтез полупроводниковых преобразователей с импульсно-модуляционным управлением. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 324 с.
31. Агунов М.В. Энергетические процессы в электрических цепях с несинусоидальными режимами и их эффективность. – Кишинев-Тольятти: МолдНИИТЭИ, 1997. – 84 с.
32. Королева Т.Н., Сеньков А.П. Судовые гребные электрические установки. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2014. – 78 с.
33. Воршевский А.А., Гальперин В.Е. Электромагнитная совместимость судовых технических средств: учебник. – СПб.: СПбГМТУ, 2010. – 316 с.

#### References

1. Rumb V.K., Yakovlev G.V., Sharov G.I., Medvedev V.V., Minasyan M.A. Sudovyye energeticheskiye ustanovki. Sudovyye dizel'nyye energeticheskiye ustanovki: uchebnik. SPbGMTU. SPb. 2007. 622 s. (In Russian)
2. Shamanov N.P. Tsvivilizatsiya, energetika, klimat v XXI veke: monografiya. SPb. SPbGMTU, 2002, 226 s. (In Russian)
3. Shamanov N.P. Kalmykov A.N. Elektrokhimicheskiye transportnyye energoustanovki s vodorodnym toplivom: monografiya. SPb. SPbGMTU, 2006. 306 s. (In Russian)
4. Dyadik A.N., Zamukov V.V., Dyadik V.A. Korabel'nyye vozdukhonezavisimyye energeticheskiye ustanovki. – SPb.: Sudostroyeniye, 2006. – 424 s. (In Russian)
5. Dyadik A.N. Nikiforov B.V. Ispol'zovaniye elektrokhimicheskikh generatorov na korablyakh: monografiya. SPb. SPbGMTU, 2011. 341 s. (In Russian)
6. Dyadik A.N. Nikiforov B.V. Korabel'nyye energeticheskiye sistemy. Novocherkassk. LIK. 2012. 680 s. (In Russian)
7. Dyadik A.N. Surin S.N. Energetika atomnykh sudov. SPb. Sudostroyeniye, 2014. 476 s. (In Russian)
8. Dyadik A.N., Fedotov P.A. Fizicheskiye protsessy v elementakh sudovogo glavnogo oborudovaniya. SPb.: OAO "TSKB MT "RUBIN", 2015. 176 s. (In Russian)
9. Novozhilov V.V., Pavlovskiy V.A. Ustanovivshiyesya turbulentnyye techeniya neshhimayemoy zhidkosti. 2-ye izdaniye. SPb.: Izd-vo SPbGU, 2012. 484 s. (In Russian)

10. Pavlovskiy V.A. Vvedeniye v termodinamiku real'nykh gazov. SPb.: Izd-vo Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra, 2013. 230 s. (In Russian)
11. Demenok S.L., Medvedev V.V., Sivukha S.M. Gidrodinamika i teploobmen v sharovykh ukladkakh: monografiya. SPb.: Strata, 2012. 192 s. (In Russian)
12. Demenok S.L., Medvedev V.V., Sivukha S.M. Vizualizatsiya techeniya zhidkosti v kanalakh: monografiya. SPb.: Strata, 2014. 134 s. (In Russian)
13. Demenok S.L., Medvedev V.V., Sivukha S.M. Vizualizatsiya potokov v kanalakh: monografiya. SPb.: Strata, 2018. 200 s. (In Russian)
14. Demenok S.L., Vysotskiy L.I., Medvedev V.V., Sivukha S.M. Potentsial'nyye techeniya zhidkosti v kanalakh: monografiya. SPb.: Strata, 2015. 106 s. (In Russian)
15. Gotovskiy M.A., Demenok S.L., Medvedev V.V., Sivukha S.M. Teplootdacha i soprotivleniye kanalov s olunennymi poverkhnostyami: monografiya. SPb.: Strata, 2016. 210 s. (In Russian)
16. Pavlovskiy V.A., Nikushchenko D.V. Vychislitel'naya gidrodinamika. Teoreticheskiye osnovy: Uchebnoye posobiye. SPb.: Izdatel'stvo «Lan», 2018. 368 s. (In Russian)
17. Dyadik A.N., Kuchinskiy D.M. Zakony tekhnicheskoy termodinamiki: uchebnoye posobiye. SPb.: Izd-vo SPbGMTU. 160 s. (In Russian)
18. Gavrilov V.V. Sudovoye glavnoye energeticheskoye oborudovaniye. Sudovyye dvigateli vnutrennego sgoraniya: ucheb. posobiye s grifom UMO. SPb.: SPGUVK, 2011. 228 s. (In Russian)
19. Gavrilov V.V., Mashchenko V.YU. Analiz protsessa goreniya v sudovom dizele po indikatornym diagrammam: ucheb. posobiye s grifom UMO. SPb.: SPbGMTU. 2015. 60 s (In Russian)
20. Gavrilov V.V. Rabochiye protsessy i dinamika sudovykh dvigateley vnutrennego sgoraniya: ucheb. posobiye s grifom UMO. SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2016. 224 s. (In Russian)
21. Shekun G.D., Tikhomirov B.A. Povysheniye effektivnosti sudovykh turbonasosnykh i turbo-kompressornykh agregatov. SPb.: Sudostroyeniye, 2006. 227 s. (In Russian)
22. Rumb V.K., Medvedev V.V. Prochnost' sudovogo oborudovaniya. V 2 ch. CH. 1. Konstruirovaniye i raschety prochnosti sudovykh dvigateley vnutrennego sgoraniya: uchebnyk s grifom Min.obr. i nauki. SPb.: SPbGMTU, 2006. 536 s. (In Russian)
23. Medvedev V.V. Primeneniye metodologii formalizovannoy otsenki bezopasnosti pri proyektirovaniy sudovoy energeticheskoy ustanovki i yeye elementov: monografiya. SPb.: Renome, 2008. 328 s. (In Russian)
24. Medvedev V.V. Primeneniye imitatsionnogo modelirovaniya dlya obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti sudovykh energeticheskikh ustanovok: monografiya. SPb.: Strata, 2013. 352 s. (In Russian)
25. Medvedev V.V. Obespecheniye nadezhnosti i bezopasnosti SEU imitatsionnym modelirovaniyem: monografiya. Germany, Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2017. 269 s. (In Russian)
26. Gorshkov V.F., Minasyan M.A. Dinamika korabel'nykh energeticheskikh ustanovok i snizheniye ikh vibroaktivnosti. SPb., Izd.: VMA im. N.G. Kuznetsova. 2000. 120 s (In Russian)
27. Minasyan M.A., Minasyan A.M.A. Amortizatsiya sudovykh dizel'nykh energeticheskikh ustanovok. SPb.: SPbGMTU, 2017. 360 s. (In Russian)
28. Khrutskiy O.V. Tekhnicheskaya diagnostika: uchebnyk. SPb.: SPbGMTU, 2005 208 s (In Russian)
29. Ravin A., Khrutskiy O. Prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya: monografiya. LAP LAMBERT Acadtmic Publishing, 2014. 141 s. (In Russian)
30. Dmitriyev B.F., Likhomanov A.M., Panin S.YU., Rozov A.YU. Garmonicheskyy analiz i sintez poluprovodnikovyykh preobrazovateley s impul'sno-modulyatsionnym upravleniyem. SPb.: Izd-vo Poli-tekh. un-ta, 2014. 324 s. (In Russian)
31. Agunov M.V. Energeticheskiye protsessy v elektricheskikh tsepyakh s nesinusoidal'nymi rezhimami i ikh effektivnost'. Kishinev-Tol'yatti: MoldNIITEI, 1997. 84 s (In Russian)
32. Koroleva T.N., Sen'kov A.P. Sudovyye grebnyye elektricheskkiye ustanovki. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2014. 78 s. (In Russian)
33. Vorshevskiy A.A., Gal'perin V.Ye. Elektromagnitnaya sovместimost' sudovykh tekhnicheskikh sredstv: uchebnyk. SPb.: SPbGMTU, 2010. 316 s. (In Russian)

УДК 629.5.03-192.008

## ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗА КОЭФФИЦИЕНТА ГОТОВНОСТИ

**Олег Валентинович Хруцкий**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры судовой автоматики и измерений  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: obx47@mail.ru

### Аннотация

Рассматривается вариант оценки эксплуатационной надежности энергомеханической системы на основе прогноза коэффициента готовности. Базисом для получения прогнозного значения коэффициента готовности служит идентифицированный тренд параметрического временного ряда. Выход идентифицированного тренда параметрического временного ряда на недопустимое значение может привести к параметрическому отказу системы, а впоследствии и к функциональному. Исходной предпосылкой при идентификации тренда параметрического временного ряда является предположение о том, что изменение контролируемого параметра во времени подчиняется некоторому детерминированному закону, который сохраняется неизменным как на интервале наблюдений за системой (базовом прогнозном периоде), так и на интервале прогнозирования. Имея аналитическое описание этого закона можно оценить как ожидаемые значения контролируемого параметра путём экстраполяции, так и время наступления этого события. В свою очередь, располагая возможным временем наступления события можно выполнить и прогнозную оценку коэффициента готовности системы.

**Ключевые слова:** энергомеханическая система, параметрический временной ряд, тренд, прогноз, коэффициент готовности.

## EVALUATION OF OPERATIONAL RELIABILITY OF THE POWER-MECHANICAL SYSTEM BASED ON THE FORECAST AVAILABILITY

**Oleg V. Khrutsky**

Doctor of technical sciences, professor,  
professor of Department of ship automation and measurement,  
St. Petersburg state marine technical university,  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008  
e-mail: obx47@mail.ru

### Abstract

The possibility of estimation of operational reliability of power-mechanical system on the basis of the forecast of coefficient of readiness is considered. The basis for obtaining the predicted value of the availability factor is the identified time series. The output of the identified trend of the parametric time series to an invalid value can lead to parametric failure of the system, and subsequently to functional failure. The initial prerequisite for the identification of the trend of the parametric time series is the assumption that the change of the controlled parameter in time is subject to a certain deterministic law, which remains unchanged both on the observation interval for the system (the base forecast period) and on the forecasting interval. Having the analytical description of this law it is possible to estimate both expected values of the controlled parameter by extrapolation, and time of occurrence of this event. In turn, having a possible time of occurrence of the event, you can perform a predictive assessment of the availability factor.

**Keywords:** energy-mechanical system, parametric time series, trend, forecast, availability factor.

### Введение

Любая энергомеханическая система (ЭМС) представляет собой некоторую структуру той или иной сложности, состоящую из определенным образом целенаправленно скомпонованных функциональных узлов, которые, в свою очередь, состоят из деталей. В процессе эксплуатации техническое состояние ЭМС изменяется, что в целом определяется деградацией параметров и

характеристик, происходящих вследствие неизбежного воздействия физических и физико-химических процессов: усталостных, трибологических (износных), коррозионных, электрокоррозионных, диффузионных и других, приводящих к ускоренному износу деталей, увеличению люфтов, нарушению теплового режима и т.д. Например, электрокоррозионный процесс в контактных группах системы управления порождает

интенсивное искрообразование, что может нарушить нормальную работу блоков электроавтоматики и, параллельно, создать электромагнитную импульсную помеху способную привести к сбою или отказу электронного оборудования. Трибологический процесс приводит к увеличению зазора между сопрягающимися деталями объекта, что, в свою очередь, порождает повышенный уровень вибрации.

В результате комплексного воздействия перечисленных факторов возникает ситуация, при которой функциональные характеристики ЭМС недопустимо изменяются и ее дальнейшая эксплуатация чревата нежелательными последствиями.

Таким образом, проблема поддержания функциональных характеристик на уровнях гарантирующих безопасную эксплуатационную надежность ЭМС является важной. Решению общих и частных задач данной проблематики посвящены многочисленные работы, например [1-5].

В предлагаемой читателям работе рассматривается задача повышения эффективности эксплуатации ЭМС на основе прогнозирования коэффициента готовности. Данная работа является развитием идей, рассмотренных в [6].

### 1. Постановка задачи

В общем случае ЭМС можно рассматривать как структуру  $S$ , состоящую из  $s$  функциональных узлов, взаимодействующих между собой посредством наличия связей  $\gamma(s)$  и представить конечным множеством [7]:

$$S := \{S, \gamma(s)\} \quad (1)$$

где знак  $:=$  указывает, что  $S$  определяется множеством  $\{\dots\}$ . Очевидно, что связи  $\gamma(s)$  между функциональными узлами будут устойчивы позитивно и эффективны до тех пор, пока действие одного или комплексно нескольких из вышеперечисленных процессов не приведет к их нарушению частично или целиком. Назовем эти процессы структуроразрушающими факторами и обозначим  $\Phi_p$ . С другой стороны структура  $S$  полностью работоспособна, если нет нарушенных межэлементных связей  $\gamma(s)$ , чему способствуют структуросоздающие факторы  $\Phi_c$ . К числу  $\Phi_c$  - факторов относятся различные управляющие воздействия, рабочие среды, внутриэлементное регулирование, физические поля, параметрические и управляющие информационные потоки. Если предположить, что структуросоздающие факторы имеют комплексную мощность  $M(\Phi_c)$ , а структуроразрушающие - мощность  $M(\Phi_p)$ , то в зависимости от соотношения этих мощностей работоспособность системы (1) можно представить функционалом работоспособности:

$$F[\gamma(s)] = 1 - \sum_i M(\Phi_p) / \sum_j M(\Phi_c), \quad (2)$$

где  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$  - соответственно число

элементов ОД, включенных в процесс нарушения связей  $\gamma(s)$  и общее число элементов ЭМС.

Согласно (2) ЭМС будет абсолютно работоспособной, когда функционал работоспособности  $F[\gamma(s)] = 1$ . В этом идеальном случае действие  $\Phi_p$ - факторов отсутствует, что в реальных условиях эксплуатации ЭМС недостижимо. С другой стороны  $F[\gamma(s)] = 0$ , когда основные межэлементные связи разрушены и ЭМС не может выполнять возложенные на нее функции – она неработоспособна. Очевидно, что условие  $0 < F[\gamma(s)] < 1$  соответствует промежуточным работоспособным состояниям ЭМС, параметры или характеристики которой находятся в пределах допустимых значений в течение некоторого времени  $T$ .

Сохранение ЭМС работоспособного состояния можно определить функцией  $R(t)$  [8]:

$$R(t) = P(T > t), \quad (3)$$

которая представляет вероятность того, что некоторый функциональный узел ЭМС не откажет в промежутке времени с момента начала его работы  $t = 0$  до момента  $t$ .

Трактовать выражение (3) можно и иначе - это вероятность того, что контролируемый параметр или характеристика функционального узла, как случайная переменная, отображающая изменение работоспособности ЭМС примет значение  $T > t$ .

В [8] отмечается, что величина  $R(t)$  понимается как синоним термина «надежность» и называется функцией надежности. Функция надежности  $R(t)$  представляет собой монотонно убывающую функцию времени  $t$ , т.к. с увеличением времени вероятность  $R(t)$  срока эксплуатации в интервале  $[0, t]$  всегда уменьшается. Такая зависимость определяется экспоненциальной  $e$ - функцией

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right), \quad (4)$$

где  $\lambda(t)$ - интенсивность отказов функционального узла ЭМС, которая, в принципе, зависит от мощности структуроразрушающих факторов  $M(\Phi_p)$ . На интервале  $T$  обслуживаемая ЭМС имеет периоды эксплуатации и периоды бездействия. С точки зрения использования ЭМС практический интерес представляют периоды эксплуатации. По функции надежности  $R(t)$  нельзя получить сведения о состоянии, в котором находится ЭМС в некоторый момент времени. Однако важно знать, когда ЭМС не сможет нормально выполнять предназначенные функции вследствие снижения работоспособности. Определиться с такой ситуацией можно на основе

готовности  $G(t)$ , которая представляет вероятность того, что обслуживаемая ЭМС будет находиться в работоспособном состоянии в любой дискретный момент времени  $t_d$  на интервале  $T$ . Готовность  $G(t)$  - это функция времени, которая имеет некоторое «постоянное» значение при условии поддержания работоспособности ЭМС путем восстановления. В общем случае считается, что  $G(0)=1$  и это допущение не противоречит функционалу работоспособности (2). При варианте  $t \rightarrow \infty$  можно определить непрерывную готовность  $G(t)$ , которая выражается через математическое ожидание времени наработки между двумя отказами (среднее время работоспособного состояния)  $E(t_p) = T_1$  и математическое ожидание времени неработоспособного состояния (среднее время восстановления работоспособности)  $E(t_H) = T_2$ :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} G(t) = E(t_p) / [E(t_p) + E(t_H)] = T_1 / (T_1 + T_2) = K_G, \quad (5)$$

где  $K_G$  - коэффициент готовности.

Согласно ГОСТ Р 27. 002-2009 [9] – коэффициент готовности (в области надежности в технике) – это вероятность того, что изделие в данный момент времени находится в работоспособном состоянии, определенная в соответствии с проектом при заданных условиях функционирования и технического обслуживания.

Как следует из этого определения, в отличие от надежности, величина которой определяется только значением  $T_1$ , готовность еще зависит и от времени, необходимого для возврата ЭМС в рабочее состояние, т.е. от  $T_2$ . Возврат ЭМС в рабочее состояние ( $T_2$ ), при наличии программы обеспечения надежности и отлаженной системы технического обслуживания и ремонта может быть регламентирован [2;3]. Что касается времени  $T_1$ , то оно не может быть регламентировано, т.к. наработка на отказ является случайным временным интервалом, зависящим от условий эксплуатации ЭМС. Однако время  $T_1$  может быть спрогнозировано по результатам диагностирования работоспособности ЭМС на основе анализа временных рядов параметров или характеристик – следовательно, может быть выполнена и прогнозная оценка коэффициента готовности ЭМС.

Таким образом, коэффициент готовности характеризует готовность ЭМС к применению по назначению только в отношении ее работоспособности в произвольный момент времени.

**2. Прогноз значения коэффициента готовности**

Прогноз  $K_G$  ЭМС целесообразно выполнять, принимая во внимание только те функциональные узлы, отказ которых может привести к отказу системы в целом, иначе - функционально значимые узлы. Также предполагается, во время проведения технического обслуживания или ремонта состояние других функциональных узлов не изменится. Данные допущения позволяют представить ЭМС в виде последовательной модели надежности (без резервирования), для которой коэффициент готовности определяется как

$$K_{Gm} = \frac{1}{1 + \sum_{m=1}^n T_{2m} / T_{1m}}, \quad (6)$$

где  $T_{1m}, T_{2m}$  - соответственно интервалы времени работы и времени технического обслуживания или ремонта  $m$ -го функционального узла;  $m = \overline{1, n}$  - общее количество функциональных узлов в ЭМС.

Анализ выражения (6) показывает, что для каждого функционально значимого узла при известном регламентном  $T_2$  и прогнозном значении  $T_1$  можно оценить его коэффициент готовности  $K_{Gm}$ , где  $m = \overline{1, k}$  и  $k < n$ . При этом коэффициент готовности  $k$  функционально значимых элементов ЭМС равен

$$K_{Gk}^* = \prod_{m=1}^k K_{Gm}. \quad (7)$$

Рассмотрим более подробно прогнозирование времени  $T_1$ , для этого обратимся к иллюстрации рис.1.

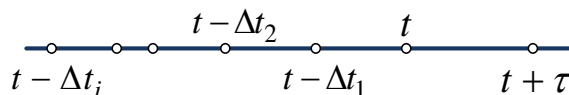


Рис.1. Ось времени «прошлое-будущее»

Пусть известны значения сигнала контролируемого параметра или характеристики функционально значимого узла ЭМС в ряде дискретных временных точек в прошлом, относительно момента времени  $t$ . Будем полагать сигнал заданным в виде  $Y_c(t) = y_c(t - \Delta t_i)$ , где  $\Delta t_i$  - отрезки времени в прошлом. Требуется по известным значениям сигнала в прошлом ( $\Delta t = 0$ ) предсказать значение сигнала в будущем для момента времени  $t + \Delta t$ , т.е. определиться  $Y_c(t) = y_c(t + \tau)$ . Такая постановка задачи полагает существование вероятностных (корреляционных) связей между прошлыми и будущими значениями сигнала.

Сигнал  $Y_c(t) = y_c(t - \Delta t_i)$  является аддитивной смесью истинного значения контролируемого параметра, погрешности измерений шумов измерительного канала и случайных помех. Поэтому, перед тем как определить будущее значение сигнала  $Y_c(t) = y_c(t + \tau)$  необходимо провести некоторую

операцию над известными значениями сигнала в прошлом. Цель такой операции заключается в выявлении регулярной составляющей сигнала  $Y_c(t) = y_c(t - \Delta t_i)$ , характеризующей тренд работоспособности функционального узла ЭМС. Для этого применяют различные способы, заключающиеся главным образом в сглаживании случайных процессов с использованием операторов сглаживания.

Обозначим оператор над прошлым символом  $\Omega$ . Тогда цель операции аналитически может быть представлена как:

$$\Omega[Y_c(t - \Delta t_i)] = Y_{cn}(t + \tau), \quad (8)$$

где  $Y_{cn}(t + \tau)$  - прогнозируемое значение сигнала контролируемого параметра.

Левая часть выражения (8) есть временной ряд значений контролируемого параметра, тренд которого необходимо идентифицировать, что позволит определить значение правой части выражения (8). В работе [10] рассмотрен один из возможных способов идентификации трендов. Суть способа заключается в следующем. Как правило, экспериментальные тренды, представленные парами значений  $Y_i, t_i$ , дают на плоскости  $(Y, t)$

существенный разброс точек с соответствующими координатами, по которым трудно выдвинуть гипотезу о подходящем типе функции тренда.

Предполагается, что множество  $\{Y_i, t_i\}$  временного ряда скрывает истинную функцию тренда посредством случайных воздействий. Множество  $\{Y_i, t_i\}$  считается ансамблем (фр. ensemble — совокупность, стройное целое)  $A(Y, t)$ , если удается найти такую плоскость  $(X, Z)$ , где  $X = X(Y, t)$  и  $Z = Z(Y, t)$ , на которой точки  $X_i, Z_i$  с некоторым разбросом располагаются вдоль некоторой гладкой кривой  $X(Z)$ , положение которой определяется коэффициентами  $a_0$  и  $a_1$ .

Когда установлено наличие ансамбля  $A(Y, t)$ , можно приступить к решению задачи об идентификации  $X(Z)$ . Действуя методом обратного хода  $X(Z) \rightarrow Y(t)$ , можно оценить тип и параметры искомого тренда  $\tilde{Y}(t)$ . При этом важно, чтобы функции  $X = X(Y, t)$  и  $Z = Z(Y, t)$  обеспечивали не только принципиальную возможность перехода  $X(Z) \rightarrow Y(t)$ , но и осуществляли это, желательно, наиболее простыми способами. Последнее возможно при условии наличия корреляционной связи.

Поскольку экспериментальный тренд, как отмечалось, отличается разбросом точек на плоскости  $(Y, t)$ , то естественно применить какой-

нибудь оператор  $\Omega$ , например сглаживание посредством интегрирования  $I$ . Далее осуществляется поиск плоскостей  $(X, Z)$  типа  $X = Y$  и  $Z = I_k Y$ , где  $k$  - кратность интеграла с пределами 0 и  $t$  от функции  $Y(t)$ . Далее интеграл кратности  $k$  обозначается  $I_k Y(t)$ . Применение оператора  $I$  позволяет представить временной ряд сглаженными зависимостями вида

$$Y(t) \cong a_0 + a_1 I_k Y(t), \quad (9)$$

где оценки коэффициентов  $a_0$  и  $a_1$  вычисляются по ансамблю  $A(Y, t)$  с помощью метода наименьших квадратов.

Выражение (9) есть интегральное уравнение, решения которого в зависимости от кратности  $k$ , например, следующие:

при  $k = 1$

$$Y(t) = a_0 \cdot \exp(a_1 t) = \tilde{Y}(t); \quad (10)$$

при  $k = 2; a_1 > 0$

$$Y(t) = a_0 \cdot ch \sqrt{a_1} \cdot t = \tilde{Y}(t); \quad (11) \quad \text{при}$$

$k = 2; a_1 < 0$

$$Y(t) = a_0 \cdot \cos \sqrt{a_1} \cdot t = \tilde{Y}(t). \quad (12)$$

Выражения (10)-(12) являются аппроксимирующими функциями (функциями тренда)  $\tilde{Y}(t)$  исходного временного ряда. Из этих конкурирующих функций выбирается одна, имеющая наибольшее значение коэффициента корреляции  $\rho_{Y\tilde{Y}}$ . Подстановка в выбранную функцию допустимого значения контролируемого параметра  $\tilde{Y}(t) = Y_{дон}$  позволяет определить прогнозное время  $t_n$  наступления этого события, а сумма ретроспективного времени и прогнозного времени дает значение  $T_1$ , что позволяет, в свою очередь, определиться с коэффициентом готовности  $K_{Г}^r$  (6).

### 3. Практический пример

Рассмотрим идентификацию функции тренда параметрического временного ряда и оценку прогнозного значения коэффициента готовности на конкретном примере.

В рамках ранее выполняемой НИР по разработке алгоритмов прогнозирования работоспособности функциональных узлов, объектом контроля являлся подшипник качения 310. Эти подшипники, как опорные, в частности, применяются в асинхронных двигателях серии А. Номинальная скорость вращения подшипника составляет 7500 об/мин, а динамическая грузоподъемность 61,8 кН.



Таблица 1

$j$	$\Delta t_j$	$Y_j$	$10^{-3} \cdot I_1 Y_j$	$10^{-4} \cdot I_2 Y_j$
1	2	83	0,170	0,017
2	4	84	0,337	0,068
3	6	80	0,501	0,155
4	8	82	0,663	0,268
5	10	85	0,830	0,417
6	12	86	1,001	0,600
7	14	89	1,176	0,818
8	16	86	1,351	1,071
9	18	88	1,525	1,358
10	20	85	1,698	1,681
11	22	90	1,873	2,037
12	24	87	2,050	2,430
13	26	91	2,288	2,857
14	28	91	2,410	3,321
15	30	94	2,595	3,821
16	32	96	2,785	4,359
17	34	96	2,977	4,935

Техническое состояние подшипника с интервалом времени  $\Delta t$  контролировалось по уровню вибрации  $Y$  дБ. Цель эксперимента заключалась в установлении влияния старения смазки на техническое состояние подшипникового узла. Смазка подшипника уменьшает трение между телами качения и сепаратором, а также бортами колец, способствует отводу тепла, амортизирует удары и вибрационные нагрузки, предохраняет подшипник от загрязнения и коррозии. Нарушение нормального процесса смазки подшипника (при условии ее достаточного количества) связано, в частности, с ее старением. Старение смазки это неизбежный процесс, вызванный, в основном, окислением и загрязнением механическими примесями. Наличие механических примесей в смазке интенсифицирует износ материала элементов подшипника качения, что приводит к изменению геометрии его элементов и, как следствие, повышению вибрации.

В момент времени  $t(\Delta t = 0)$  (см. рис.1) было зарегистрировано значение вибрации, соответствующее уровню «Предупреждение», при котором необходимо произвести снижение нагрузки на объект [2]. Если такое действие невозможно по ряду обстоятельств, то объект в течение некоторого промежутка времени перейдет в категорию неудовлетворительного состояния, требующего проведения технического обслуживания или ремонта. В таблицу 1 сведены ретроспективные значения экспериментального тренда вибрации

подшипникового узла  $Y(t)$  начиная с  $t(\Delta t = 2)$  условных единиц времени, соответствующего категории хорошего технического состояния и результаты сглаживания этого ряда операторами  $I_k Y(t), k=1;2$ .

Численное решение уравнений сглаженных зависимостей (9) и вычисление коэффициентов корреляции  $\rho_{Y\tilde{Y}}$  определили следующие результаты:

$$\tilde{Y}_1(\Delta t) = 80,35 + 4,85 \cdot 10^{-3} I_{1Y}; \rho_{Y\tilde{Y}} = 0,9107; \quad (13)$$

$$\tilde{Y}_2(\Delta t) = 82,98 + 2,73 \cdot 10^{-4} I_{2Y}; \rho_{Y\tilde{Y}} = 0,9230. \quad (14)$$

Сглаженные зависимости (13),(14) являются интегральными уравнениями, решение которых есть:

$$\tilde{Y}(\Delta t) = 80,35 \cdot \exp(0,00485\Delta t); \sigma = 2,440; \quad (15)$$

и  $\Delta t = 2$  условным единицам времени  $\tilde{Y}(\Delta t) = 82,98 \cdot ch(0,0165\Delta t); \sigma = 2,039, \quad (16)$

где  $\sigma$  - среднеквадратичное отклонение идентифицированного тренда от экспериментального.

С учетом значений коэффициентов корреляции и среднеквадратических отклонений за рабочий тренд для прогнозирования коэффициента готовности подшипникового узла примем выражение (16). На рис.2 показан экспериментальный тренд  $Y(t)$ , идентифицированный тренд  $\tilde{Y}(t)$  и ансамбль  $A(Y, t)$  подшипникового узла.

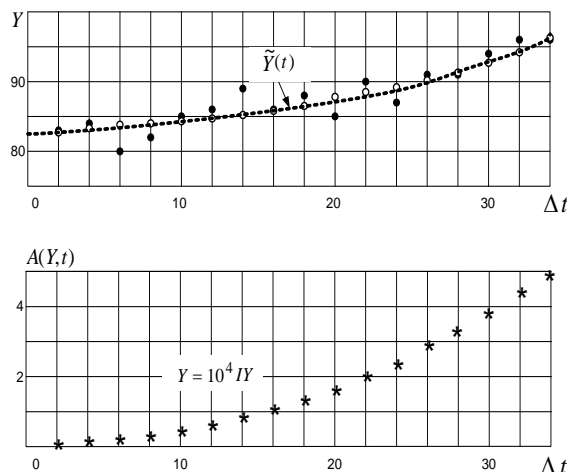


Рис.2. Экспериментальный (•) тренд  $Y(t)$ , идентифицированный (—o—) тренд  $\tilde{Y}(t)$  и ансамбль (\*)  $A(Y, t)$

Будем считать, что эксплуатация подшипникового узла возможна до допустимого уровня вибрации  $Y_{дон} = 100$ дБ, по достижении которого необходимо проведение соответствующих мероприятий. Подставив допустимое значение вибрации в

выражение (16) можно определить  $\Delta t = 38$ , т.е. прогноз составляет  $(t + \tau) - t = \tau = 4\Delta t$  (см. рис.1).

На интервале  $\tau$  должно быть выполнено техническое обслуживание подшипникового узла, предусматривающее замену смазки.

Допустим, что временные затраты на эту работу составляют 3% от прогнозного  $\tau$ . С учетом полученных результатов, прогнозируемый коэффициент готовности (7) подшипникового узла

составит не более  $K_{Г} = 0,970$ , а коэффициент готовности ЭМС (8)

соответственно  $K_{Г}^* = 0,97 \cdot \prod_{m=1}^{k-1} K_{Гm}$ . Предположим,

что сомножитель  $\prod_{m=1}^{k-1} K_{Гm} = 0,988$ , тогда

коэффициент готовности ЭМС после проведения технического обслуживания подшипникового узла составит  $K_{Г}^* = 0,958$  и выражает собой вероятность того, что ЭМС в любой момент времени может находиться в исправном состоянии.

### Заключение

Приведенный материал показывает принципиальную возможность применения оценки эксплуатационной надежности энергомеханических систем на основе прогнозирования параметрических временных рядов и коэффициента готовности. Вместе с тем ясно, что требуется проведение более широких исследований с целью подтверждения эффективности рассмотренного метода на реальных энергомеханических объектах. Полученные результаты могут быть положены в основу перспективной стратегии обслуживания по прогнозу изменения технического состояния объекта.

### Литература

1. Рябинин И.А., Парфенов Ю.М. Надежность, живучесть и безопасность электроэнергетических систем. СПб.: ВМА им. Н.Г. Кузнецова, 1997.
2. Никитин А.М. Управление технической эксплуатацией судов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006.
3. Мясников Ю.Н. Надежность и техническая диагностика судовых энергомеханических систем (НТДИКА). СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2008.
4. Медведев В.В. Применение имитационного моделирования для обеспечения надежности и безопасности судовых энергетических установок. СПб.: Страта, 2013.
5. Равин А.А. Методы диагностики судового энергетического оборудования. СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2013.
6. Верес М.В., Хруцкий О.В. Применение технической диагностики для повышения эффективности эксплуатации дизель-генераторных установок. Двигателестроение, №3, 2002, с.11-14.
7. Хруцкий О.В. Техническая диагностика. СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2018.
8. Фритч В. Применение микропроцессоров в системах управления (пер. с нем.). М.: Мир, 1984.
9. ГОСТ Р 27.002-2009. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2011.
10. Соболев Л.Г., Хруцкий О.В. К вопросу об идентификации экспериментальных трендов. Контроль и диагностика (Testing, Diagnostics), 6 (72), 2004, с. 39-42.

### References

1. Ryabinin I.A., Parfenov Yu. M. Nadyozhnost', zhivuchest' i bezopasnost' elektroenergeticheskix system. SPb.: VMA im. N.G. Ruznecova, 1997.
2. Nikitin A.M. Upravlenie texnicheskoy e'kspluataciej sudov. SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2006.
3. Myasnikov Yu. N. Nadyozhnost' i texnicheskaya diagnostika sudovix e'nergomexanicheskix sistem (NTDIKA). SPb.: CNII im. akad. A.N. Kry'lova. 2008.
4. Medvedev V.V. Primenenie imitacionnogo modelirovaniya dlya obespecheniya nadyozhnosti i bezopasnosti sudovy'x e'nergeticheskix ustanovok. SPb.: Strata, 2013.
5. Ravin A.A. Metody' diagnostiki sudovogo e'nergeticheskogo oborudovaniya. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2013.
6. Veres M.V., Khrutsky O.V. Priminenie texnicheskoy diagnostiki dlya povy'sheniya e'ffektivnosti e'kspluatatsii dizel'-generatorny'x ustanovok. Dvigatelistroenie, №3, 2002, s. 11-14/
7. Khrutsky O.V. Texnicheskaya diagnostika. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2018.
8. Frittsch V. Priminenie mikroprocessorov v sistemax upravlniya (per. s nem.). M.: Mir, 1984.
9. GOST-R 27.002-2009. Nadyozhnost' v texnike. Terminy' i opredeleniya. M.: Standartinform, 2011.
10. Sobolev L.G., Khrutsky O.V. K voprosu ob identifikatsii e'ksperimental'ny'x trendov. Kontrol' i diagnostika

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

УДК 517.927.2

**ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ШТУРМА-ЛИУВИЛЛЯ  
СО СЛОЖНЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ****Валерий Дмитриевич Лукьянов**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий учебным центром  
ОАО «Авангард»,

195271, Санкт-Петербург, Кондратьевский пр., 72

e-mail: lukyanovvd@rambler.ru

**Людмила Васильевна Носова**

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент  
ВКА им. А.Ф. Можайского,

197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

e-mail: lvn1201@gmail.com

**Алексей Витальевич Богородский**

доктор технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник  
АО «Концерн «Океанприбор»,

197376, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., 46

e-mail: fizika@smtu.ru

**Дмитрий Владимирович Никущенко**

доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета

190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

e-mail: science@smtu.ru

**Дмитрий Борисович Островский**

доктор технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник  
АО «Концерн «Океанприбор»,

197376, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., 46

e-mail: fizika@smtu.ru

**Аннотация**

Предложен метод нахождения собственных функций и вычисления собственных значений задачи Штурма-Лиувилля для линейного дифференциального оператора второго порядка. Сложные граничные условия задачи представляют собой линейную комбинацию значений функции и её производных. Коэффициенты линейной комбинации являются параметрами, которые в прикладных задачах задают физическую модель объекта исследования. Собственные значения являются корнями трансцендентного уравнения, которое содержит параметры задачи. Искомая функциональная зависимость собственных значений от параметров задачи для сложных граничных условий не является элементарной функцией. Это ограничивает возможности математического моделирования. Применяемые в настоящее время численные методы позволяют при заданных значениях параметров задачи найти лишь приближенные численные значения собственных чисел задачи Штурма-Лиувилля.

Предложенный в работе метод позволяет найти искомую приближенную аналитическую зависимость собственных значений от параметров задачи в виде элементарной функции. Функциональная зависимость параметров задачи от собственных значений является обратной функцией по отношению к искомой зависимости. При реализации нашего метода важно, что эта зависимость представляет собой элементарную функцию. После аппроксимации этой обратной функции элементарной функцией, такой, что её обратная функция также есть элементарная функция, получаем приближённую аналитическую зависимость, которая задаёт искомую функцию.

Метод изложен на примере задачи о вращательных колебаниях упругого стержня, нагруженного на своих концах дисками с одинаковыми моментами инерции.

**Ключевые слова:** Задача Штурма-Лиувилля, собственные значения, трансцендентное уравнение, аппроксимация, обратная функция.

## APPRXIMATE SOLUTION OF THE STURM-LIOUVILLE PROBLEM WITH COMPLEX BOUNDARY CONDITIONS

**Valery D. Lukyanov**

Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor, Head of Training Department of  
OJSC Avangard, 195271, St. Petersburg, Kondratyevsky pr., 72  
e-mail: lukyanovvd@rambler.ru

**Lyudmila V. Nosova**

PhD in Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of  
Aerospace Academy named after A.F. Mozhayskiy  
197198, St. Petersburg, Zhdanovskaya, 13  
e-mail: lvn1201@gmail.com

**Alexey V. Bogorodskiy**

Dr.Sci.Tech, Senior Researcher  
Concern Okepribor, JSC, 197376, St. Petersburg, Chkalovsky pr., 46 e-mail: fizika@smtu.ru

**Dmitry V. Nikuschenko**

Dr.Sci.Tech, Professor, Vice Rector for Scientific Studies  
St. Petersburg State Maritime Technical University 190121, St. Petersburg, st. Lotsmanskaya, 3  
e-mail: science@smtu.ru

**Dmitry B. Ostrovsky**

Dr.Sci.Tech, Senior Researcher  
Concern Okepribor, JSC, 197376, St. Petersburg, Chkalovsky pr., 46 e-mail: fizika@smtu.ru

### Abstract

A method is proposed for finding eigenfunctions and calculating the eigenvalues of the Sturm-Liouville problem for a second-order linear differential operator. The complex boundary conditions of the problem are a linear combination of the values of the function and its derivatives. The coefficients of a linear combination are parameters that, in applied problems, define a physical model of the object of study. The eigenvalues are the roots of the transcendental equation, which contains the parameters of the problem. The required functional dependence of the eigenvalues on the parameters of the problem for complex boundary conditions is not an elementary function. This limits the possibilities of mathematical modeling. Currently used numerical methods allow for finding only approximate numerical values of the eigenvalues of the Sturm-Liouville problem for the given values of the parameters of the problem.

The proposed method allows finding the desired approximate analytical dependence of the eigenvalues on the parameters of the problem as an elementary function. The functional dependence of the parameters of the problem on eigenvalues is an inverse function with respect to the desired dependence. When implementing our method, it is important that this dependence is an elementary function. After approximation of this inverse function by an elementary function, such that its inverse function is also an elementary function, we obtain an approximate analytic dependence that defines the desired function.

The method is described on the example of the problem of rotational oscillations of an elastic rod loaded at its ends by disks with the same moments of inertia.

**Keywords:** Sturm-Liouville problem, eigenvalues, transcendental equation, approximation, inverse function.

### Введение

При математическом моделировании физических процессов различной природы возникают дифференциальные уравнения в частных производных, называемые уравнениями математической физики. Линейные уравнения математической физики решаются методом Фурье (методом разделения переменных), который приводит к задаче Штурма-Лиувилля [1, 2].

Задача Штурма-Лиувилля – это краевая задача для однородного обыкновенного линейного дифференциального уравнения с однородными граничными условиями. Существование ненулевого решения задачи Штурма-Лиувилля, которое называют собственной функцией, обеспечивается выбором значения произвольной постоянной, которая присутствует в этой задаче. Знание собственных функций и соответствующих им собственных значений позволяет свести уравнение

математической физики к обыкновенным дифференциальным уравнениям.

Известно, что для задачи Штурма-Лиувилля с классическими условиями первого рода, когда собственная функция обращается в нуль в граничной точке, и второго рода, когда в нуль обращается производная функции, собственные значения находят из решения элементарных тригонометрических уравнений, которые допускают аналитическое решение [2, 3].

Сложные граничные условия представляют собой линейную комбинацию искомой функции и её производных различного порядка. В прикладных задачах коэффициенты линейных соотношений вычисляются через параметры физической модели. Простейшим примером сложных граничных условий является классическое граничное условие третьего рода, когда в граничной точке в нуль обращается линейная комбинация функции и её производной [1, 2].

Собственные значения задачи Штурма-Лиувилля со сложными граничными условиями есть корни трансцендентного уравнения, содержащего параметры физической модели. Для нахождения собственных значений используют различные численные и приближенные методы. Корни уравнения зависят от параметров модели, но эти зависимости, как правило, не элементарны, что усложняет прикладной анализ решения исходного уравнения математической физики.

Предлагаемая далее методика позволяет строить приближенную аналитическую зависимость собственного значения задачи Штурма-Лиувилля со сложными граничными условиями.

Изложение методики проводим на конкретной задаче Штурма-Лиувилля, которая возникает в известной задаче математической физики о крутильных колебаниях упругого цилиндрического стержня конечной длины, отягощенного на своих концах массивными одинаковыми дисками [3, 4].

### 1. Постановка и решение задачи Штурма-Лиувилля

Решаем задачу Штурма-Лиувилля: ищем собственные функции  $y = y(x)$ , не тождественно равные нулю и удовлетворяющие однородному линейному дифференциальному уравнению

$$y''(x) = \mu y(x) \quad (1)$$

в интервале  $0 < x < 1$  и граничным условиям:

$$y''(0) - \alpha y'(0) = 0, \quad (2)$$

$$y''(1) + \alpha y'(1) = 0, \quad (3)$$

где  $\mu \leq 0$ ,  $\mu$  – искомое собственное значение, которое обеспечивает существование ненулевого решения задачи Штурма-Лиувилля;  $\alpha$  – параметр задачи, значение которого задано, причем в прикладных задачах имеем условие  $\alpha > 0$ .

Для удобства ищем величину  $\lambda \geq 0$ , которая связана с собственным значением  $\mu$  соотношением  $\mu = -\lambda^2$ , что обеспечивает условие не положительности собственного значения  $\mu$ .

Общее решение уравнения (1) имеет вид

$$y(x) = C_1 \cos \lambda x + C_2 \sin \lambda x. \quad (4)$$

Из граничных условий (2) и (3) получим систему уравнений для определения произвольных постоянных  $C_1$  и  $C_2$

$$\begin{cases} \lambda^2 C_1 + \alpha \lambda C_2 = 0, \\ \lambda(\lambda \cos \lambda + \alpha \sin \lambda)C_1 + \lambda(\lambda \sin \lambda - \alpha \cos \lambda)C_2 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Для существования ненулевого решения однородной системы линейных алгебраических уравнений требуется равенство нулю главного определителя системы  $\Delta$ :

$$\Delta = \lambda^2(\lambda^2 \sin \lambda - \alpha^2 \sin \lambda - 2\alpha \lambda \cos \lambda) = 0. \quad (6)$$

Уравнение (6) имеет нулевой корень, которому согласно решению (4) соответствует собственная функция  $y_0(x) = C_1$ .

Положительные значения  $\lambda$  определяем из трансцендентного уравнения, которое получим из уравнения (6) после элементарных преобразований

$$2 \operatorname{ctg} \lambda = \frac{\lambda}{\alpha} - \frac{\alpha}{\lambda}. \quad (7)$$

В известных методах, излагаемых в [3, 4], при решении уравнения (7) фиксируют значение параметра  $\alpha = \alpha_0$  и, например, графическим методом вычисляют искомые корни  $\lambda = \lambda(\alpha_0)$ , как абсциссы точек пересечения графиков функций:  $y = 2 \operatorname{ctg} \lambda$  и  $y = \lambda/\alpha - \alpha/\lambda$ .

Имеем счётное множество координат точек пересечения  $\lambda_n > 0$ , где  $n = 1, 2, \dots$ , нумерацию выбираем так, что с ростом порядкового номера  $n$  величина  $\lambda_n$  увеличивается.

Уравнение (7) также решают приближенно, фиксируя значение параметра задачи  $\alpha = \alpha_0$ , и используя какой-либо численный метод, например, метод итераций или метод Ньютона, когда для собственного значения выбирают начальное приближение, а затем последовательно его уточняют.

При математическом моделировании физического объекта полезно иметь аналитические зависимости собственных значений от параметра задачи, что не обеспечивает численный метод.

После нахождения значений  $\lambda_n(\alpha_0)$  согласно формуле (4) находим собственную функцию задачи Штурма-Лиувилля с порядковым номером  $n = 1, 2, \dots$ :

$$y_n(x) = \alpha \cos(\lambda_n x) - \lambda_n \sin(\lambda_n x),$$

где учтено равенство  $C_2 = -(\lambda_n/\alpha)C_1$ , которое следует из первого уравнения в системе (5), и выбрано  $C_1 = \alpha$ .

### 2. Методика приближенного аналитического решения задачи Штурма-Лиувилля со сложными граничными условиями

#### 2.1. Нахождение функциональных зависимостей между собственными значениями и параметром задачи Штурма-Лиувилля

Уравнение (6) определяет искомые зависимости  $\lambda_n = \varphi_n(\alpha)$ . Эти аналитические зависимости не являются элементарными. Поэтому поставим задачу: найти приближенное аналитическое решение уравнения (6), которое представляет собой элементарную функцию. Под элементарной функцией принято понимать функцию, в аналитической записи которой используются основные элементарные функции и стандартные элементарные действия [5].

Для решения этой задачи воспользуемся тем, что обратная функция  $\alpha = \psi(\lambda)$  является элементарной функцией. Область определения этой функции:  $\lambda > 0$ ; область требуемых значений:  $\alpha > 0$ .

Если считать, что задана величина  $\lambda$ , то относительно параметра  $\alpha$  уравнение (6) – это квадратное уравнение. Вычислим корни уравнения:

$$\alpha_1 = \psi^{(1)}(\lambda) = \frac{\lambda}{\sin \lambda} (1 - \cos \lambda),$$

$$\alpha_2 = \psi^{(2)}(\lambda) = -\frac{\lambda}{\sin \lambda} (1 + \cos \lambda).$$

Функцию  $\psi^{(1)}(\lambda)$ , положительную на интервалах  $(2\pi(n-1), \pi(2n-1))$ , а функцию  $\psi^{(2)}(\lambda)$ , положительную на интервалах  $(\pi(2n-1), 2\pi n)$ , при  $n = 1, 2, \dots$  обозначим на этих интервалах соответственно через  $\psi_n^{(1)}(\lambda)$  и  $\psi_n^{(2)}(\lambda)$ . В области определения эти функции совпадают с функцией  $\alpha = \psi(\lambda)$ . Функции  $\psi_n^{(1)}(\lambda)$  и  $\psi_n^{(2)}(\lambda)$  – монотонные и непрерывные, с вертикальными асимптотами. На левом конце каждого промежутка непрерывности они стремятся к нулю, а при приближении аргумента к правому концу промежутка стремятся к  $+\infty$ , прижимаясь к вертикальным асимптотам.

На рис. 1 показан график функции  $\alpha = \psi(\lambda)$  представленный графиками функций  $\psi_n^{(1)}(\lambda)$  и  $\psi_n^{(2)}(\lambda)$  на промежутках с номерами  $n = 1, 2$ . Графики

зависимостей показаны с учётом условий  $\lambda > 0, \alpha > 0$ .

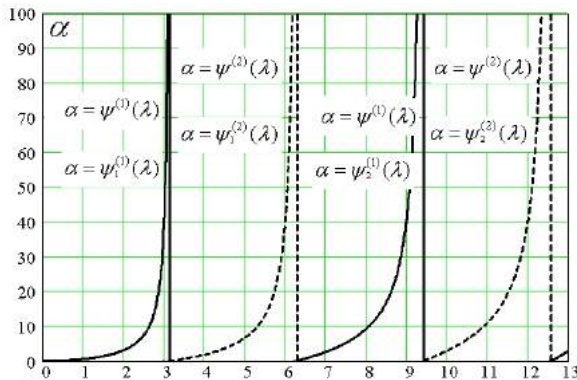


Рис. 1. Зависимости параметра задачи  $\alpha$  от величины  $\lambda$ : сплошные линии –  $\alpha = \psi_n^{(1)}(\lambda)$ , штриховые линии –  $\alpha = \psi_n^{(2)}(\lambda)$ .

Функции  $\psi_n^{(1)}(\lambda)$  и  $\psi_n^{(2)}(\lambda)$  имеют обратные функции, которые обозначим соответственно через  $\lambda = \varphi_n^{(1)}(\alpha)$  и  $\lambda = \varphi_n^{(2)}(\alpha)$ . Их графики симметричны графикам функций  $\psi_n^{(1)}(\lambda)$  и  $\psi_n^{(2)}(\lambda)$  относительно биссектрисы угла в первом квадранте.

На рис. 2 приведены графики функций  $\lambda = \varphi_n^{(1)}(\alpha)$  и  $\lambda = \varphi_n^{(2)}(\alpha)$  для  $n = 1, 2$

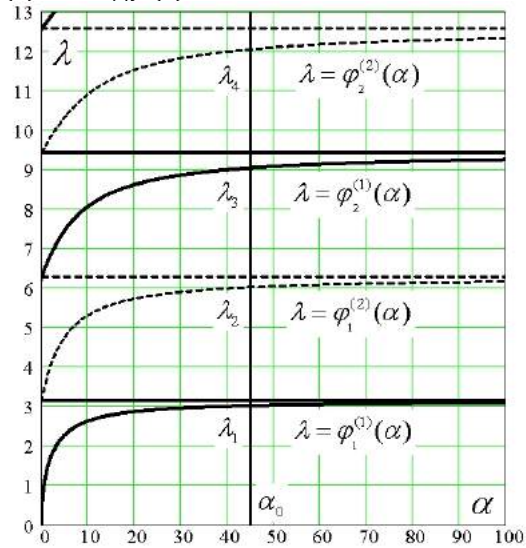


Рис. 2. Зависимости величины  $\lambda$  от параметра задачи  $\alpha$ : сплошные линии –  $\lambda = \varphi_n^{(1)}(\alpha)$ , штриховые линии –  $\lambda = \varphi_n^{(2)}(\alpha)$

Искомые значения  $\lambda_n$  при значении параметра задачи  $\alpha = \alpha_0$  находим как ординаты точек пересечения прямой  $\alpha = \alpha_0$ , (вертикальный отрезок на рис. 2) с графиками функций  $\lambda = \varphi_n^{(1)}(\alpha)$  и  $\lambda = \varphi_n^{(2)}(\alpha)$ .

На рис. 2 введена сквозная нумерация корней: объединены две серии собственных значений  $\lambda_n^{(1)}$  и  $\lambda_n^{(2)}$  в одну объединенную серию  $\lambda_n$ , где  $\lambda_{2n-1} = \lambda_n^{(1)}$ ,  $\lambda_{2n} = \lambda_n^{(2)}$  при  $n = 1, 2, \dots$

Имеем последовательности взаимно обратных функций  $\alpha = \psi_n(\lambda)$  и  $\lambda = \varphi_n(\alpha)$ , где

$$\psi_{2n-1}(\lambda) = \psi_n^{(1)}(\lambda), \psi_{2n}(\lambda) = \psi_n^{(2)}(\lambda);$$

$$\varphi_{2n-1}(\alpha) = \varphi_n^{(1)}(\alpha), \varphi_{2n}(\alpha) = \varphi_n^{(2)}(\alpha).$$

2.2. Аппроксимация функциональных зависимостей между собственными значениями и параметром задачи Штурма-Лиувилля

Функции  $\alpha = \psi_n(\lambda)$  аппроксимируем элементарными функциями  $\gamma = \gamma_n(\lambda)$  так, чтобы они удовлетворяли тем же граничным условиям, что и функции  $\psi_n(\lambda)$ , и чтобы обратные по отношению к ним функции также были элементарными.

Выберем для функции  $\alpha = \psi_n(\lambda)$  аппроксимирующую функцию с параметрами аппроксимации  $r_n$  и  $Q_n$  в виде

$$\gamma = \gamma_n(\lambda) = Q_n \left( \frac{\lambda - \pi(n-1)}{\pi n - \lambda} \right)^{r_n} \quad (9)$$

Функция  $\gamma = \gamma_n(\lambda)$  удовлетворяет граничным условиям и имеет обратную функцию на интервале  $(\pi(n-1), \pi n)$ , причем обратная функция также элементарная:

$$\gamma_n^{-1}(\gamma) = \frac{\pi(n-1)(Q_n)^{\delta_n} + \pi n(\gamma)^{\delta_n}}{(Q_n)^{\delta_n} + (\gamma)^{\delta_n}}, \quad (10)$$

где  $\delta_n = 1/r_n$ .

График функции  $\gamma = \gamma_n(\lambda)$  должен аппроксимировать график функции  $\alpha = \psi_n(\lambda)$ . Параметр аппроксимации  $Q_n$  позволяет равномерно растягивать график функции вдоль оси ординат, а параметр  $r_n$  отвечает за изгиб кривой.

Искомые величины  $r_n$  и  $Q_n$  ищем методом наименьших квадратов, который обеспечит наилучшую аппроксимацию:  $\gamma_n(\lambda) \cong \psi_n(\lambda)$ .

Вычислив параметры аппроксимации при заданном значении параметра задачи  $\alpha = \alpha_0$ , получим значения  $\lambda_n$ , используя формулу (10). Затем находим собственные значения задачи Штурма-Лиувилля:  $\mu_n = -\lambda_n^2$ .

2.3. Нахождение параметров аппроксимации

Для нахождения параметров аппроксимации  $r_n$  и  $Q_n$  вычислим  $M_n$  значений функции  $\psi_n(\lambda)$ :  $\alpha_{nm} = \psi_n(\lambda_{nm})$ , где  $m = 1, 2, \dots, M_n$ . Значения аргументов  $\lambda_{nm}$ , узлов аппроксимации, выбираем произвольно на  $n$  промежутке  $(\pi(n-1), \pi n)$ , например, можно выбрать равноотстоящие значения. Результат аппроксимации функции, конечно, будет зависеть от выбора узлов аппроксимации.

Для применения метода наименьших квадратов прологарифмируем равенство (9)

$$\ln(\gamma_n(\lambda)) = r_n R_n(\lambda) + q_n, \quad (11)$$

где

$$R_n(\lambda) = \ln \left( \frac{\lambda - \pi(n-1)}{\pi n - \lambda} \right), \quad q_n = \ln(Q_n). \quad (12)$$

Будем искать величины  $r_n$  и  $q_n$  из условия обеспечения минимума функции  $F_n(r_n, q_n)$  – среднего значения суммы квадратов расхождения значений  $\ln(\alpha_{nm})$  и  $\ln(\gamma_n(\lambda_{nm}))$ :

$$F_n(r_n, q_n) = \overline{(\ln \alpha_n - \ln \gamma_n)^2} = \frac{1}{M_n} \sum_{m=1}^{M_n} (\ln(\alpha_{nm}) - r_n R_n(\lambda_{nm}) - q_n)^2, \quad (13)$$

где использовано обозначение для вычисления среднего значения величины  $Z$ , принимающей значения  $z_1, z_2, \dots, z_M$ :

$$\bar{z} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M z_m.$$

Условие минимума функции  $F_n(r_n, q_n)$  – равенство нулю частных производных функции  $F_n$  по аргументам  $r_n$  и  $q_n$  – приводит к системе линейных алгебраических уравнений относительно величин  $r_n$  и  $q_n$

$$\begin{cases} r_n \overline{R_n^2} + q_n \overline{R_n} = \overline{R_n \ln \alpha_n}, \\ r_n \overline{R_n} + q_n = \overline{\ln \alpha_n}. \end{cases} \quad (14)$$

Решение системы (14) даёт значения

$$r_n = \frac{\overline{R_n \ln \alpha_n} - \overline{R_n} \overline{\ln \alpha_n}}{\overline{R_n^2} - (\overline{R_n})^2}, \quad (15)$$

$$q_n = \overline{\ln(\alpha_n)} - r_n \overline{R_n}. \quad (16)$$

Параметр аппроксимации  $Q_n$  найдем из соотношения (12)

$$Q_n = e^{q_n}. \quad (17)$$

#### 2.4. Эмпирические формулы для аппроксимирующих параметров

Выполненные численные расчеты с использованием формул (15) и (17) позволили получить для величин  $r_n$  и  $Q_n$  удобные эмпирические формулы, выведенные с использованием метода наименьших квадратов:

$$r_n = 0.88 + \frac{0.24}{(n - 0.25)^{1.50}}, \quad (18)$$

$$Q_n = \pi(n - 1) + 1.20. \quad (19)$$

Анализ результатов расчетов собственных значений по формуле (10) с использованием эмпирических формул (18) и (19) показал, что абсолютная погрешность вычисления собственных значений  $\mu_n$  не превосходит 0.01.

#### Заключение

Наличие аналитических зависимостей для собственных значений задачи Штурма-Лиувилля  $\mu_n(\alpha)$  при  $n = 1, 2, \dots$  позволяет провести всестороннее математическое исследование физического явления, из моделирования которого получена задача Штурма-Лиувилля. Например, аналитическая зависимость  $\mu_n(\alpha)$  будет необходима при оптимизации физического явления, когда параметром оптимизации выступает величина  $\alpha$ .

#### Литература

1. Бабич В.М., Капилевич М.Б., Михлин С.Г и др. Линейные уравнения математической физики.– М.: Наука, 1964.
2. Бабич В.М., Григорьева Н.С. Ортогональные разложения и метод Фурье.– Л.: Изд. ЛГУ, 1989.
3. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Дифференциальные уравнения математической физики.– М.: GIFML, 1962.
4. Будак Б.М., Самарский А.А., Тихонов А.Н. Сборник задач по математической физике.– М.: Наука, 1987.
5. Морозова В.Д. Введение в анализ.– М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.

#### References

1. Babich V.M., Kapilevich M.B., Mikhlin S.G i dr. Lineynyye uravneniya matematicheskoy fiziki. Moscow, Nauka, 1964.
2. Babich V.M., Grigor'yeva N.S. Ortogonal'nyye razlozheniya i metod Fur'ye. Leningrad, LGU, 1989.
3. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. Differentsial'nyye uravneniya matematicheskoy fiziki. Moscow, GIFML, 1962.
4. Budak B.M., Samarskiy A.A., Tikhonov A.N. Sbornik zadach po matematicheskoy fizike. Moscow, Nauka, 1987.
5. Morozova V.D. Vvedeniye v analiz. Moscow, MGTU im N.E. Baumana, 2000.



УДК 534.143+532.5.032+541.13+534.23

**АКУСТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ, ПОСТРОЕННЫЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ  
ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ****Борис Пинкусович Шарфарец**

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт аналитического  
приборостроения Российской академии наук» (ИАП РАН)  
190103, Санкт-Петербург, Рижский пр., 26,  
e-mail: iap@ianin.spb.su

**Герман Андреевич Лебедев**

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
e-mail: office@smtu.ru

**Дмитрий Сергеевич Пыхов**

магистр по направлению механика и математическое моделирование, ведущий инженер ГГК-3  
АО «АКВАМАРИН»  
198097, Санкт-Петербург, ул. Баррикадная, 17.  
e-mail: mail@aquamarin.ru

**Владимир Алексеевич Сергеев**

главный специалист по научно-техническому обеспечению проектирования  
АО «АКВАМАРИН»  
198097, Санкт-Петербург, ул. Баррикадная, 17.  
e-mail: mail@aquamarin.ru

**Александр Иванович Сетин**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой морских информационных  
систем и технологий  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
e-mail: alset3103@rambler.ru

**Аннотация**

Предложены необходимые уравнения и краевые условия для описания акустических полей, вызываемых электрокинетическими явлениями: наличием двойного электрического слоя и приложенного электрического поля, являющегося суммой постоянного поля и электрического поля, несущего акустическую информацию. Уравнения рассматриваются для условий вязкой несжимаемой и сжимаемой жидкости при условии расчета соответственно гидродинамики стационарного электроосмотического процесса и акустического процесса. Из полученных выражений видно, что процессы, происходящие при акустическом электроосмосе имеют как много общего, так и содержат некоторые отличия от процессов классического электроосмоса. Разработанная в работе физическая модель и полученные соответствующие математические выражения позволяют рассчитывать акустические характеристики излучателя, основанного на наличии электрокинетических явлений и оптимизировать его устройство. Полученные результаты могут использоваться в научном приборостроении. Приведен пример модельных расчетов.

**Ключевые слова:** электроакустическое преобразование, электрокинетические явления, гидродинамика электроосмоса, акустика электроосмоса, уравнения движения акустического электроосмоса.

**ACOUSTIC CONVERTER DESIGNED ON THE BASIS OF USE OF  
ELECTROKINETIC PHENOMENA****Boris P. Sharfarets**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher  
Federal State Budgetary Institution of Science "Institute of Analytical  
Instrumentation of the Russian Academy of Sciences (IAI RAS)  
190103, St. Petersburg, Rizhski Prospect, 26  
e-mail: iap@ianin.spb.su

**German A. Lebedev**

Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor, Head of Physics Department of  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: office@smtu.ru

**Dmitry S. Pihov**

Master in Mechanics and Mathematical Modeling, Leading Engineer of GGK-3

JSC "AKVAMARIN"  
198097, St. Petersburg, Barrikadnaya, 17.  
e-mail: mail@aquamarin.ru

**Vladimir A. Sergeev**  
Chief Specialist in Scientific and Technical Support Design  
JSC "AKVAMARIN"  
198097, St. Petersburg, Barrikadnaya, 17.  
e-mail: mail@aquamarin.ru

**Alexander I. Setin**  
Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Head of the Department of Marine Information Systems and Technologies  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: alset3103@rambler.ru

**Abstract**

The necessary equations and boundary conditions are proposed for describing acoustic fields caused by electrokinetic phenomena: availability of a double electric field and an applied electric field, which is the sum of a constant field and an electric field carrying acoustic information. The equations are assumed for the conditions of a viscous incompressible and compressible fluid and respectively are subject to calculation of the hydrodynamics of the stationary electroosmotic and acoustic processes. From the expressions obtained it can be seen that the processes occurring during acoustic electroosmosis have much in common, and contain some differences from the processes of classical electroosmosis. The physical model developed in the paper and the corresponding mathematical expressions obtained allow calculating the acoustic characteristics of the projector based on the availability of electrokinetic phenomena and optimizing its structure. The results can be used in scientific instrument engineering. An example of model calculations is given.

**Keywords:** electroacoustic transformation, electrokinetic phenomena, hydrodynamics of electroosmosis, acoustics of electroosmosis, equations of motion of acoustic electroosmosis.

**Введение**

В патенте [1] был предложен новый метод генерации акустических волн. В работе [2] было рассмотрено альтернативное физическое обоснование предложенного в [1] изобретения в части его гидродинамического аспекта. Здесь рассмотрим акустический аспект описанного в [1] изобретения.

**1. Основные уравнения**

Здесь рассмотрим основные уравнения, краевые условия и предпосылки для их последующего упрощения.

В работе [2, выражения (3а), (6), (7)] приведена система уравнений Навье-Стокса, позволяющая описать гидродинамику стационарных электроосмотических процессов в капилляре. При этом само уравнение (6) в работе [2], полученное из уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости описывает течение стационарной вязкой несжимаемой жидкости при условии баланса сил трения и электрических сил. Краевое условие (7) работы [2] говорит о равенстве нулю тангенциальной составляющей скорости жидкости на границе скольжения  $v_t = 0$ . Кроме того, в общем случае должна быть равна нулю нормальная составляющей скорости жидкости на границе скольжения  $v_n = 0$  [3, с. 36]. Наконец, возникает еще одно краевое условие для нормальной производной потенциала  $\phi$  стороннего электрического поля  $\mathbf{E}$ : на поверхностях скольжения должно выполняться условие  $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$  [3, с. 37].

Условия, при которых среду можно считать несжимаемой. Остановимся на критериях, когда

среду можно считать несжимаемой. Свойство сжимаемости среды характеризуется величиной  $\Delta\rho/\rho$  относительного изменения плотности среды  $\rho$  в гидродинамическом процессе. Величина  $\Delta\rho/\rho \ll 1$  при выполнении следующих условий [4, с.

$$253]: 1) |v| \ll c; 2) L \ll t^*c; 3) gL \ll c^2; 4) \beta\Delta T \ll 1$$

. Здесь  $|v|$ ,  $c$ ,  $L$ ,  $t^*$  и  $\Delta T$  - соответственно характерные для рассматриваемого процесса скорость среды, скорость звука, длина, время и изменение температуры;  $\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}$  - коэффициент

теплового расширения;  $g$ - ускорение силы тяжести. В случае незначительного влияния изменения температуры  $\Delta T$  на параметры среды, а также возможность пренебрежения силой тяжести, существенными условиями несжимаемости среды остаются условия 1), 2). Однако, при изучении явлений, само существование которых обусловлено способностью среды изменять плотность (распространение звука, конвекция и т.д.) нельзя пренебрегать величиной  $\Delta\rho/\rho$ , как бы мала она ни была.

*Гидродинамические уравнения.* С учетом того, что в акустических процессах жидкость нельзя считать несжимаемой, закон сохранения импульса запишем применительно к движению вязкой сжимаемой однородной жидкости (без учета силы тяжести) [5, с. 73]:

$$\rho_{\Sigma} \left( \frac{\partial \mathbf{v}_{\Sigma}}{\partial t} + (\mathbf{v}_{\Sigma} \cdot \nabla) \mathbf{v}_{\Sigma} \right) = -\nabla p_{\Sigma} + \eta \Delta \mathbf{v}_{\Sigma} + \left( \zeta + \frac{\eta}{3} \right) \nabla \nabla \cdot \mathbf{v}_{\Sigma} + \rho_{el} \mathbf{E}_{\Sigma} \quad (1)$$

здесь  $\eta, \zeta$  - динамическая и объемная вязкости соответственно;  $p_{\Sigma}$  - давление,  $\mathbf{v}_{\Sigma}$  - вектор скорости в среде;  $\rho_{\Sigma}$  - плотность среды;  $\rho_{el}$  - объемная плотность заряда в двойном электрическом слое (ДЭС);  $\mathbf{E}_{\Sigma} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}$ , где постоянное электрическое поле  $\mathbf{E}_0 = \text{const}$  модулируется коллинеарным ему электрическим, зависящим от времени вектором  $\mathbf{E}$  ( $\mathbf{E} \times \mathbf{E}_0 = 0$ ); величины, помеченные индексом  $\Sigma$  обозначают поля, возбужденные полем  $\mathbf{E}_{\Sigma}$ . Пометим поля, вызванные электрическим полем  $\mathbf{E}_0$  нижним индексом 0:  $p_0, \mathbf{v}_0$ . Кроме того обозначим через  $\rho_0$  невозмущенное значение плотности имеющее место в том числе и при воздействии только поля  $\mathbf{E}_0$ , поскольку при стационарном электроосмосе среда считается несжимаемой. Тогда, если принять во внимание допущение о том, что скорости процессов соответствуют малым значениям числа Рейнольдса  $Re \ll 1$ , то в (1) можно пренебречь конвективным членом  $\rho_{\Sigma} (\mathbf{v}_{\Sigma} \cdot \nabla) \mathbf{v}_{\Sigma}$  [5, с. 89], что превращает нелинейное уравнение (1) в его линеаризованную версию, для которой справедлив принцип суперпозиции:  $\rho_{\Sigma} = \rho_0 + \rho, p_{\Sigma} = p_0 + p, \mathbf{v}_{\Sigma} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}$ .

Пусть стационарный электроосмос подчиняется усеченному уравнению Навье-Стокса (1) (см. [2])

$$\eta \Delta \mathbf{v}_0 + \rho_{el} \mathbf{E}_0 = 0, \quad (2)$$

(что означает баланс сил трения и постоянных электрических сил) т.е. постоянная разность давления отсутствует  $\nabla p_0 = 0$ , член с временной производной равен нулю из-за стационарности процесса, член содержащий дивергенцию  $\left( \zeta + \frac{\eta}{3} \right) \nabla \nabla \cdot \mathbf{v}_0$  равен нулю вследствие соглашения о несжимаемости стационарного процесса. Или формально

$$\nabla p_0 = 0; \quad \frac{\partial \mathbf{v}_0}{\partial t} = 0; \quad \nabla \cdot \mathbf{v}_0 = 0. \quad (3)$$

Система (2), (3) описывает стационарное электроосмотическое течение под воздействием постоянного электрического поля при рассмотрении баланса электрических сил и сил трения. На долю возмущенного решения приходится остающаяся часть уравнения

$$\rho_{\Sigma} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{v} + \left( \zeta + \frac{\eta}{3} \right) \nabla \nabla \cdot \mathbf{v} + \rho_{el} \mathbf{E}, \quad (4)$$

Для придания уравнению (4) линейного акустического вида необходимо линеаризовать член  $\rho_{\Sigma} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}$  до акустических величин первого порядка, а именно

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{v} + \left( \zeta + \frac{\eta}{3} \right) \nabla \nabla \cdot \mathbf{v} + \rho_{el} \mathbf{E}. \quad (5)$$

Часто для быстроразвивающихся процессов принимается предположение о справедливости соотношения Стокса [6, с. 385], сводящееся к равенству нулю объемной вязкости  $\zeta = 0$ . В этом случае уравнение (5) упрощается,

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{v} + \frac{\eta}{3} \nabla \nabla \cdot \mathbf{v} + \rho_{el} \mathbf{E}, \quad (5a)$$

позволяя обходиться только значением динамической вязкости  $\eta$ . Впрочем, о правомерности применения соотношения Стокса см. рассуждения в работе [7, с. 208-209].

К уравнению движения (5) либо (5a) необходимо добавить линеаризованное уравнение непрерывности

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (6)$$

а для замыкания системы четырех уравнений для пяти неизвестных добавить уравнение состояния. Для простоты принимаем среду баротропной, что означает однозначную зависимость между давлением в среде и ее плотностью. Для давления  $p$  и соответствующей ей плотности  $\rho$  это означает  $p_{\Sigma} = f(\rho_{\Sigma})$ , или в линеаризованном виде

$$p = \left. \frac{\partial p_{\Sigma}}{\partial \rho_{\Sigma}} \right|_{\rho_{\Sigma}=\rho_0}, \quad p = c^2 \rho, \quad (7)$$

где  $c$  - скорость звука в среде. Из (7) имеем

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (7a)$$

Система (5)-(7) представляет собой замкнутую систему линейных уравнений акустики для однородной, вязкой, баротропной среды (см., например, [8, § 1]), где  $\mathbf{v}$  - вектор колебательной скорости,  $p$  - акустическое давление,  $\rho_0$  - равновесное значение плотности, а  $\rho$  - возмущение плотности, вызванное возмущением давления, т.е. акустическим давлением  $p$ .

## 2. Решение уравнений

Удобный способ решения системы (5)-(7) состоит в том, что на основании известной теоремы Гельмгольца векторного анализа принимается стандартное представление вектора скорости  $\mathbf{v}$  в виде суммы потенциальной  $\mathbf{v}_l$  и соленоидальной  $\mathbf{v}_t$  частей (см., например [9, с. 345]), подстановка которой в (5), позволяет получить:

$$\left[ \rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}_l}{\partial t} + \nabla p - \left( \zeta + \frac{4}{3} \eta \right) \Delta \mathbf{v}_l - \rho_{el} \mathbf{E} \right] + \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right\} \Phi = - \frac{ik^2 \varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\zeta}}{\omega \rho_0 \lambda_D^2} \frac{l_0 (r/\lambda_D)}{l_0 (a/\lambda_D)} \bar{E} z, \quad (8)$$

$$+ \left[ \rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}_t}{\partial t} - \eta \Delta \mathbf{v}_t \right] = 0$$

Применяя к (8) стандартную процедуру разделения потенциальных и соленоидальных составляющих, получим для скалярного и векторного потенциалов соответственно:

$$\rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -p + \left( \zeta + \frac{4}{3} \eta \right) \Delta \Phi - \rho_{el} \Phi, \quad (9)$$

$$\rho_0 \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \eta \Delta \Psi, \quad (10)$$

Учитывая соотношение между акустическим давлением  $p$  и акустическим возмущением плотности  $\rho$ , а также условие непрерывности (6) и выражение (8), после преобразований будем иметь:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\rho_0 c^2 \nabla \cdot \mathbf{v} = -\rho_0 c^2 \nabla \cdot \mathbf{v}_l = -\rho_0 c^2 \Delta \Phi, \quad (11)$$

*Случай гармонического стационарного процесса.* В гармоническом случае сохраняем для полей те же обозначения для амплитуд, подразумевая наличие гармонического множителя  $e^{-i\omega t}$ , с учетом которого выражение (9) примет вид

$$-i\omega \rho_0 \Phi = -\frac{\rho_0 c^2}{i\omega} \Delta \Phi + \left( \zeta + \frac{4}{3} \eta \right) \Delta \Phi - \rho_{el} \Phi, \quad (12)$$

а с учетом (11) переписывается как:

$$-i\omega \rho_0 \Phi = -\frac{\rho_0 c^2}{i\omega} \Delta \Phi + \left( \zeta + \frac{4}{3} \eta \right) \Delta \Phi + \rho_{el} \bar{E} z, \quad (13)$$

*Объемная плотность заряда.* Остановимся на величине  $\rho_{el}$  - объемной плотности заряда, соответствующей распределению зарядов в диффузионном слое электроосмотического процесса при различных поверхностях раздела фаз. Для плоской границы раздела фаз (плоскость  $x=0$ ) величина  $\rho_{el}$  на расстоянии  $x$  от плоскости раздела вычисляется по формуле [11, с. 148; 12]

$$\rho_{el}(x) = -\varepsilon \varepsilon_0 \Delta \varphi = -\varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -\frac{\varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\zeta}}{\lambda_D^2} \exp\left(-\frac{x}{\lambda_D}\right) \quad (14)$$

При этом уравнение (13) с учетом (14) и введения волнового числа  $k$  потенциальных волн (см., например, [13, 14]) запишется как:

$$\left[ \Delta + k^2 \right] \Phi = -\frac{ik^2 \varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\zeta}}{\omega \rho_0 \lambda_D^2} \exp\left(-\frac{x}{\lambda_D}\right) \bar{E} z. \quad (15)$$

В случае круговой симметрии задачи (13) преобразуется к виду:

Таким образом, для амплитуды скалярного потенциала скорости  $\Phi$  получены неоднородные уравнения Гельмгольца (22), (23). Правая часть этих уравнений, как и в случае стационарного электроосмоса, пропорциональна амплитуде электрического потенциала  $\bar{E}$  и величине дзета-потенциала  $\tilde{\zeta}$ , а также обратно пропорциональна величинам динамической вязкости  $\eta$  и объемной вязкости  $\zeta$ . Кроме того,  $\Phi$  как и в стационарном случае, пропорциональна произведению диэлектрической проницаемости среды и электрической постоянной  $\varepsilon \varepsilon_0$ .

*Влияние векторного потенциала.* Уравнение (10) для векторного потенциала в гармоническом случае записывается в виде уравнения Гельмгольца

$$\Delta \Psi + k_t^2 \Psi = 0. \quad (17)$$

Здесь  $k_t = (1+i)/\delta$ , где  $\delta = \sqrt{2 \frac{\eta}{\rho_0 \omega}} = \sqrt{2\nu/\omega}$  где  $\nu$  -

кинематическая вязкость, а величина  $\delta$  называется глубиной проникновения вязких волн (см., например, [13; 14; 16, с. 63]). Решение (26) для плоской волны представляет собой неоднородную плоскую волну с

экспоненциально убывающей амплитудой  $e^{-\frac{x}{\delta}}$ , где  $x$  - длина пути прохождения плоской волны от плоскости  $x=0$ .

Глубина проникновения вязкой волны  $\delta$  для воздуха при температуре 20°C равна  $\delta = \sqrt{2 \cdot 1.51 \cdot 10^{-5}}/\omega$ , а для воды при температуре 20°C:  $\delta = \sqrt{2 \cdot 1.06 \cdot 10^{-6}}/\omega$ . Как видно из приведенных формул и полученных результатов, глубина проникновения вязкой волны  $\delta$  в воздухе больше, чем в воде и обратно пропорциональна корню квадратному из частоты. Характер изменения величины  $\chi_{0,1}$  примерно повторяет поведение величины  $\delta$ .

Поведение величин  $\delta$  и  $\chi_{0,1}$  следует учитывать при расчетах полевых характеристик акустического поля через скалярный и векторный потенциалы. В случае, если  $\chi_{0,1} \ll a$ , можно ограничиваться при расчетах учетом только скалярного потенциала. В противном случае необходимо учитывать оба потенциала.

*Отличие акустического электроосмоса от классического.* Классический электроосмос в отличие от акустического предполагает временную стационарность, несжимаемость жидкости, и присутствие сторонней силы только в виде постоянного электрического поля. Отсюда использование простой математической модели в виде упрощенного уравнения Навье-Стокса,

решением которого является стационарное течение  $\mathbf{v}$  с единственной составляющей  $v_z$ , совпадающей по направлению с действием внешнего вектора электрической напряженности  $\mathbf{E}_0 = (0, 0, E_{0z})$ .

Решение этого уравнения тривиально [3, с. 34; 17, с. 218] и не нуждается в использовании векторного потенциала  $\Psi$ .

В акустическом электроосмосе уравнение Навье-Стокса много сложнее. Во-первых, оно нестационарно в смысле зависимости от времени, во-вторых, жидкость уже нельзя считать несжимаемой и в третьих, нельзя обойтись простым балансом сил между электрическим полем и силами трения, необходимо учитывать также и силу акустического давления.

*Краевые условия.* В классическом электроосмосе ставятся следующие краевые условия [3, с. 34; 17, с. 218]:

1. вектор скорости  $\mathbf{v}$  на плоскости скольжения равен нулю; для плоской границы раздела это означает  $\mathbf{v}|_{x=a} = 0$ , или, учитывая, что  $\mathbf{v} = (0, 0, v_z)$ :

$v_z|_{x=a} = 0$ ; для цилиндрической границы раздела соответственно  $\mathbf{v}|_{r=a} = 0$  или  $v_z|_{r=a} = 0$ ;

2. вне диффузного слоя производные электроосмотических скоростей  $\frac{\partial v_z}{\partial x} = 0$  и  $\frac{\partial v_z}{\partial r} = 0$  соответственно для плоской и цилиндрической границ;

3. вне диффузного слоя потенциал  $\Phi_{eo}$  двойного электрического слоя стабилизируется и становится равным нулю, что отражается равенствами  $\frac{\partial \Phi_{eo}}{\partial x} = 0$  и  $\frac{\partial \Phi_{eo}}{\partial r} = 0$  соответственно для плоской и цилиндрической границ раздела; кроме того вне диффузного  $\Phi_{eo} = 0$ .

Очевидно, что в случае акустического электроосмоса при наличии второй составляющей вектора скорости, кроме условий 1-3 ко второму краевому условию для классического электроосмоса необходимо добавить условие равенства нулю второй составляющей скорости на поверхности скольжения:  $v_x|_{x=0} = 0$  и  $v_r|_{r=0} = 0$  соответственно.

Учитывая краевое условие 1, последние краевые условия и то, что составляющие вектора скорости  $v_y = 0$  и  $v_\varphi = 0$  для плоского и цилиндрического случаев соответственно, можно в общем виде записать краевое условие для акустического электроосмоса  $\nabla \Phi|_a = 0$ , т.е. равенство нулю градиента скалярного потенциала на поверхности скольжения.

### 3. Пример численного моделирования

В качестве примера рассмотрен один из вариантов численного моделирования процесса акустического преобразования, основанного на явлении электроосмоса. В качестве математической

модели использовалось исходное уравнение Навье-Стокса (1) (в его нелинейном виде, как для гидродинамического течения, так и для акустических колебаний) при соблюдении описанных выше краевых условий. Принимались следующие исходные величины: в качестве жидкости принималась вода, для пористой структуры был выбран стеклянный цилиндрический капилляр

радиусом  $a = 10^{-6}$  м и длиной 1 см, а значение электрокинетического потенциала было принято  $\zeta = 100$  мв. К торцам капилляра подавалось

суммарное напряжение  $2(U_0 + U)$ , соответствующее векторам электрической напряженности  $\mathbf{E}_0, \mathbf{E}$  (последнее было гармоническим, частотой  $f = 1000$  Гц). Величина амплитуды  $U$  была принята 1000 в. В процессе численного эксперимента амплитуда  $U_0$

варьировалась в диапазоне  $U_0 \in [0, 150]$  в.

Акустическое давление  $p$  рассчитывалось на торце капилляра. Было получено, что практически с самого начала роста амплитуды  $U_0$  величина давления  $p$  начинает практически линейно увеличиваться, в то время как амплитуда акустического сигнала  $U$  остается неизменной. Это означает перекачку энергии стационарного напряжения в собственно акустический процесс. Происходит это по причине существенной нелинейности математической модели рассматриваемого процесса.

### Заключение

В работе предложены необходимые уравнения и краевые условия для описания акустических полей, вызываемых электрокинетическими явлениями: наличием двойного электрического слоя и приложенного электрического поля, являющегося суммой постоянного поля и электрического поля, несущего акустическую информацию. Уравнения рассматриваются для условий вязкой несжимаемой и сжимаемой жидкости для условий расчета соответственно гидродинамики стационарного электроосмотического процесса и зависящего от времени акустического процесса. Как видно из полученных выражений, процессы, происходящие при акустическом электроосмосе имеют как много общего, так и содержат некоторые отличия от процессов классического электроосмоса. Разработанная в работе физическая модель и полученные соответствующие математические выражения позволяют рассчитывать акустические характеристики излучателя, основанного на наличии электрокинетических явлений и оптимизировать его устройство. Приведен численный эксперимент, демонстрирующий любопытное явление: перекачку энергии стационарного потока в акустический процесс.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Государственное задание № 07500780-19-00

### Литература

1. Shishov S.V., Andrianov S.A., Dmitriev S.P., Ruchkin D.V. Method of converting electric signals into acoustics oscillations and an electric gas-kinetic transducer. United States Patent # US 8,085,957, B2 Dec. 27, 2011.
2. Сергеев В.А., Шарфарец Б.П. Об одном новом методе электроакустического преобразования. Теория, основанная на электрокинетических явлениях. Часть I. Гидродинамический аспект//Научное приборостроение. 2018. Т. 28. № 2. С. (в печати)
3. Духин С.С., Дерягин Б.В. Электрофорез. М.: Наука. 1976. 332 с.
4. Механика сплошных сред в задачах/Под общ. Ред. М.Э. Эглит. М.: ЛЕНАНД. 2017. 640 с.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука. 1988. 736 с.
6. Кочин Н.Е., Кибель Е.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч. II. М.: ГИФМЛ. 1963. 728 с.
7. Серрин Дж. Математические основы классической механики жидкости. М.: Иностранная литература. 1963. 256 с.
8. Руденко О.В., Солуян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука. 1975. 288 с.
9. Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Волны в сплошных средах. М.: Физматлит. 2004. 472 с.
10. Бреховских Л.М., Гончаров В.В. Введение в механику сплошных сред в приложении к теории волн. М.: Наука. 1982. 336 с.
11. H. Bruus. Theoretical Microfluidics. Oxford University Press. 2008. 346 P.
12. Князьков Н.Н., Шарфарец Б.П., Шарфарец Е.Б. Базовые выражения, используемые в электрокинетических явлениях. Обзор//Научное приборостроение. 2014. Т. 24. № 4 С. 13-21.
13. Doinikov A.A. Acoustic radiation pressure on a rigid sphere in a viscous fluid//Proc. R. Soc. Lond. (1994) Pp. 447-466.
14. Doinikov A.A. Acoustic radiation pressure on a compressible sphere in a viscous fluid//J. Fluid Mech. (1994). V. 267. Pp. 1-21.
15. Дж. А. Стрэттон Теория электромагнетизма. М.: ОГИЗ. 1948. 539 с.
16. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука. 1973. 496 с.
17. Ньюмен Дж. Электрохимические системы. М.: Мир. 1977. 464 с.

#### References

1. Shishov S.V., Andrianov S.A., Dmitriev S.P., Ruchkin D.V. Method of converting electric signals into acoustics oscillations and an electric gas-kinetic transducer. United States Patent # US 8,085,957, B2 Dec. 27, 2011.
2. Sergeev V.A., Sharfarets B.P. Ob odnom novom metode ehlektro-akusticheskogo preobrazovaniya. Teoriya, osnovannaya na ehlektrokineticheskikh yavleniyah. CHast' I. Gidrodinamicheskij aspekt//Nauchnoe priborostroenie. 2018. Т. 28. № 2. С. (v pechati)
3. Duhin S.S., Deryagin B.V. EHlektroforez. М.: Nauka. 1976. 332 s.
4. Mekhanika sploshnyh sred v zadachah/Pod obshch. Red. M.EH. EHglit. М.: LENAND. 2017. 640 s.
5. Landau L.D., Lifshic E.M. Teoreticheskaya fizika. Т. 6. Gidrodinamika. М.: Nauka. 1988. 736 s.
6. Kochin N.E., Kibel' E.A., Roze N.V. Teoreticheskaya gidromekhanika. CH. II. М.: GIFML. 1963. 728 s.
7. Serrin Dzh. Matematicheskie osnovy klassicheskoy mekhaniki zhidkosti. М.: Inostr. literatura. 1963. 256 s.
8. Rudenko O.V., Soluyan S.I. Teoreticheskie osnovy nelinejnoy akustiki. М.: Nauka. 1975. 288 s.
9. Gorshkov A.G., Medvedskij A.L., Rabinskij L.N., Tarlakovskij D.V. Volny v sploshnyh sredah. М.: Fizmatlit. 2004. 472 s.
10. Brekhovskih L.M., Goncharov V.V. Vvedenie v mekhaniku sploshnyh sred v prilozhenii k teorii voln. М.: Nauka. 1982. 336 s.
11. H. Bruus. Theoretical Microfluidics. Oxford University Press. 2008. 346 P.
12. Knyaz'kov N.N., Sharfarets B.P., Sharfarets E.B. Bazovye vyrazheniya, ispol'zuemye v ehlektrokineticheskikh yavleniyah. Obzor//Nauchnoe priborostroenie. 2014. Т. 24. № 4 С. 13-21.
13. Doinikov A.A. Acoustic radiation pressure on a rigid sphere in a viscous fluid//Proc. R. Soc. Lond. (1994) Pp. 447-466.
14. Doinikov A.A. Acoustic radiation pressure on a compressible sphere in a viscous fluid//J. Fluid Mech. (1994). V. 267. Pp. 1-21.
15. Dzh. A. Strehnton Teoriya ehlektromagnetizma. М.: OGIZ. 1948. 539 s.
16. Isakovich M.A. Obshchaya akustika. М.: Nauka. 1973. 496 s.
17. N'yumen Dzh. EHlektrohimicheskie sistemy. М.: Mir. 1977. 464 s.

УДК 539.19+ 532.5.032

## СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИКИ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НОВОГО ТИПА

**Борис Пинкусович Шарфарец**

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт аналитического  
приборостроения Российской академии наук» (ИАП РАН)  
190103, Санкт-Петербург, Рижский пр., 26,  
e-mail: iap@ianin.spb.su

**Сергей Васильевич Горин**

доктор технических наук, доцент, доцент кафедры физики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
e-mail: fizika@smtu.ru

**Василий Семенович Майоров**

доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,  
196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44,  
e-mail: fizika@smtu.ru

**Валерий Дмитриевич Лукьянов**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий учебным центром  
ОАО «Авангард»,  
195271, Санкт-Петербург, Кондратьевский пр., 72  
e-mail: lukyanovvd@rambler.ru

**Александр Иванович Сетин**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой морских информационных  
систем и технологий  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
e-mail: alset3103@rambler.ru

### Аннотация

Статья посвящена учету ряда особенностей электроосмотического процесса в стандартной электрогидродинамической (ЭГД)-модели, для чего проводится детализация отдельных уравнений ЭГД-системы, приводятся реальные оценки используемых параметров. ЭГД-система адаптируется под решение электроосмотических задач путем привлечения хорошо развитого аппарата электрохимического потенциала заряженных частиц. Получена замкнутая система ЭГД-уравнений для такого специфического подраздела электрогидродинамики, как электроосмотические явления. ЭГД-система не содержит уравнения диффузии для поиска поля концентраций ионов. В работе они рассчитаны проще в приближении Дебая-Хюккеля. Это позволяет упростить расчет электроосмотических потенциалов и плотностей зарядов ионов. Проведена коррекция других уравнений ЭГД-системы с учетом особенностей электроосмотических процессов. Наличие в системе уравнения теплопроводности позволяет рассчитывать поле температуры в жидкости, что является крайне необходимым для поддержания необходимого температурного режима при реализации на практике излучателя нового типа. Результаты могут быть использованы при проектировании акустического преобразователя, основанного на использовании электрокинетических явлений.

**Ключевые слова:** электрогидродинамика, электроосмотический процесс, электрогидродинамическая система уравнений, приближение Дебая-Хюккеля, концентрация ионов.

## SYSTEM OF ELECTROHYDRODYNAMICS EQUATIONS FOR CALCULATION OF A NEW TYPE ELECTRO-ACOUSTICAL TRANSDUCER

**Boris P. Sharfarets**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher  
Federal State Budgetary Institution of Science "Institute of Analytical  
Instrumentation of the Russian Academy of Sciences (IAI RAS)  
190103, St. Petersburg, Rizhski Prospect, 26  
e-mail: iap@ianin.spb.su

**Sergey V. Gorin**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: fizika@smtu.ru



**Vasily S. Mayorov**

Dr.Sci.Tech, Senior Researcher, Chief Researcher  
FSUE "Krylov State Research Center"  
196158, St. Petersburg, Moskovskoye shosse, 44  
e-mail: fizika@smtu.ru

**Valery D. Lukyanov**

Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor, Head of Training Department of  
OJSC Avangard, 195271, St. Petersburg, Kondratyevsky pr., 72  
e-mail: lukyanovvd@rambler.ru

**Alexander I. Setin**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Head of the Department of Marine Information Systems and Technologies  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: alset3103@rambler.ru

**Abstract**

The article is devoted to taking into account a number of features of the electroosmotic process in the standard electrohydrodynamic (EHD) model, for which a detailed elaboration of the individual equations of the EHD-system is carried out, and real estimates of the parameters used are given. The EHD-system is adapted to the solution of electroosmotic problems by introducing a well-developed apparatus of the electrochemical potential of charged particles. A closed system of EHD-equations for such a specific subsection of electrohydrodynamics, as electroosmotic phenomena, is obtained. The EHD-system does not contain the diffusion equations for searching the ion concentration field. In the paper, they are calculated more simply in the Debye-Hückel approximation. This allows simplifying the calculation of electroosmotic potentials and ion charge densities. Correction of other equations of the EHD-system was carried out taking into account the features of electroosmotic processes. The presence in the system of the heat conduction equation makes it possible to calculate the temperature field in the liquid that is extremely necessary to maintain the required temperature regime when a new type exciter is implemented in practice. The results can be used in the design of an acoustic transducer based on the use of electrokinetic phenomena.

**Keywords:** electrohydrodynamics, electroosmotic process, electrohydrodynamic system of equations, Debye-Hückel approximation, ion concentration.

**Введение**

В работе [1] был описан акустический преобразователь нового типа, построенный на использовании электрокинетических явлений. В этой работе при описании математической модели процесса была использована усеченная система уравнений, включающая в себя только уравнение сохранения импульса, уравнение непрерывности и уравнение состояния. Однако, в задачах гидродинамики в случаях, когда источником движения является внешнее электрическое поле принято применять более подробную систему уравнений для расчета параметров течения жидкости - систему уравнений электрогидродинамики (ЭГД).

В работе [2] был проведен анализ стандартной ЭГД-системы уравнений в целях описания физических процессов, протекающих при возбуждении акустической энергии в упомянутом электроакустическом преобразователе. Однако (и в [2] это было частично отмечено), стандартная математическая ЭГД-модель нуждается в адаптации к физическим процессам, происходящим в излучателе нового типа. Одной из важнейших физических особенностей изучаемого процесса является наличие двойного электрического слоя (ДЭС) на границах раздела фаз вне зависимости от наличия стороннего электрического поля. Известно, что в ДЭС нарушается условие электронейтральности электрических зарядов в жидкой фазе. В существующих ЭГД-моделях эта особенность не учитывается, в частности, при записи

уравнения закона сохранения энергии, в котором в выражении для источника джоулева тепла отсутствует учет ДЭС. Кроме того, в системе ЭГД-уравнений для вычисления концентраций электрических зарядов необходимо решать уравнения массопереноса (диффузии), что безусловно усложняет и без того непростую ЭГД-систему уравнений. Вместе с тем, в электроосмотических моделях используется аппарат электрохимического потенциала (т.е. химического потенциала электрически заряженных частиц и квазичастиц (ионов, электронов и т.д.) в электрическом поле).

**1. Постановка проблемы**

Работа посвящена учету ряда особенностей электроосмотического процесса в стандартной ЭГД-модели, для чего проводится детализация отдельных уравнений ЭГД-системы, приводятся реальные оценки их параметров, основываясь, в частности, на материалах работы [3]. Кроме того, необходимо адаптировать ЭГД-систему под решение электроосмотических задач путем привлечения хорошо развитого аппарата электрохимического потенциала заряженных частиц.

**2. Решение проблемы**

*ЭГД-система.* Выпишем вначале ЭГД-систему, заимствованную в [4] и представленную в [2] выражениями (15)-(21):

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T = \chi \Delta T + \frac{\sigma E^2}{\rho c_p}, \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi, \quad (4)$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} + \rho_e \mathbf{v} + \varepsilon_0 \frac{\partial(\varepsilon \mathbf{E})}{\partial t} + \nabla \times (\mathbf{P} \times \mathbf{v}), \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = 0, \quad (6)$$

$$\mathbf{f} = \rho \mathbf{E} - \frac{\varepsilon}{2} \nabla E^2 + \frac{\varepsilon}{2} \nabla \left( E \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right). \quad (7)$$

здесь  $\rho$  - плотность;  $\mathbf{v}$  - поле вектора скорости;  $p$  - поле давления в жидкости;  $\mathbf{g}$  - вектор ускорения силы тяжести;  $\mathbf{f}$  - объемная внешняя сила;  $\eta$  - динамическая вязкость жидкости;  $T$  - абсолютная температура в жидкости;  $\chi$  - коэффициент температуропроводности жидкости;  $c_p$  - удельная теплоемкость при постоянном давлении;  $\sigma$  - удельная электропроводность;  $\mathbf{E}$  - вектор напряженности приложенного электрического поля;  $\varphi$  - скалярный потенциал поля;  $\mathbf{E}, \mathbf{P}$  - вектор поляризации;  $\mathbf{j}$  - плотность тока;  $\rho_e$  - плотность электрического заряда в жидкости;  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon$  - соответственно электрическая постоянная и диэлектрическая проницаемость;  $E = |\mathbf{E}|$  - модуль вектора  $\mathbf{E}$ .

В приведенной ЭГД-системе уравнение (1) – это уравнение Навье-Стокса (сохранения импульса) для несжимаемой жидкости; (2) – уравнение непрерывности для несжимаемой жидкости; (3) – уравнение сохранения энергии (теплопроводности); объемная сила  $\mathbf{f}$  в (1) принимается равной пондеромоторной силе (7), возникающей вследствие приложения к жидкости внешнего поля  $\mathbf{E}$ .

Откорректируем, по крайней мере, два уравнения из приведенной выше ЭГД-системы (1)-(7): уравнения (3) и (5). В обоих случаях для этого понадобится уточнить формулу (5) плотности тока  $\mathbf{j}$ , которая неразрывно связана с подвижностью ионов, определяемую из рассмотрения баланса сил трения Стокса  $\mathbf{F}_S$  и Кулона  $\mathbf{F}_C$ , действующих на ион с зарядом  $e$ . Сила Кулона  $\mathbf{F}_C$  равна  $\mathbf{F}_C = e\mathbf{E}$ . Сила Стокса  $\mathbf{F}_S$  равна  $\mathbf{F}_S = -6\pi\eta R_h \mathbf{v}_e$ . Здесь  $R_h$  - гидродинамический радиус иона (он обычно превышает реальный радиус иона  $a$  [6, с. 145]). Баланс этих сил при скорости  $\mathbf{v}_e$  дает:

$$\mathbf{F}_C + \mathbf{F}_S = 0 \Rightarrow e\mathbf{E} = 6\pi\eta R_h \mathbf{v}_e \Rightarrow$$

$$\mathbf{v}_e = \frac{e}{6\pi\eta R_h} \mathbf{E} \equiv u\mathbf{E} \Rightarrow \mathbf{v}_e = \frac{e}{6\pi\eta R_h} \mathbf{E} \equiv u\mathbf{E} \Rightarrow$$

$$u = \frac{e}{6\pi\eta R_h},$$

где  $u$  - подвижность иона.

При определении плотности тока кроме рассмотренных выше сил Стокса и Кулона обычно рассматривают силу, вызванную давлением на ион со стороны других ионов. Это давление определяется в приближении идеального газа выражением  $p = ck_B T$ , а сама сила равна

$\mathbf{F}_B = -\frac{1}{c} \nabla (ck_B T)$  [3, с. 22]. Здесь постоянная Больцмана  $k_B$  равна  $k_B = 1.38064852$  Дж/К.

Коэффициент диффузии  $i$ -го иона  $D_i$  связан с его подвижностью соотношением Эйнштейна [5, с. 258]

$$D_i = u_i k_B T.$$

Используя данное соотношение, а также соотношения  $\mathbf{j}_{im} = \sigma_i \mathbf{E}$  и  $\mathbf{v}_{ei} = u_i \mathbf{E}$ , легко получить выражение для удельной ионной проводимости  $\sigma_i$  для рассматриваемого типа ионов [6, с. 145]:

$$\sigma_i = C_i e_i u_i = \rho_{ei} u_i.$$

а также выражение для вектора суммарной скорости движения этих ионов  $\mathbf{U}_i$  под воздействием указанных сил, а также с учетом движения самой жидкости [3, с. 24]

$$\mathbf{U}_i = \mathbf{v}_{ei} - D_i \frac{\nabla C_i}{C_i} + \mathbf{v} = u_i \mathbf{E} - \mathbf{v}_{Di} + \mathbf{v}. \quad (8)$$

здесь  $\mathbf{v}_{ei} = u_i \mathbf{E}$  - миграционная скорость рассматриваемых ионов;  $\mathbf{v}_{Di} = D_i \frac{\nabla C_i}{C_i}$  - их скорость, вызванная диффузионными процессами и  $\mathbf{v}$  - скорость самой среды.

Совокупная плотность тока рассматриваемого типа ионов получается умножением в (8) совокупной скорости  $i$ -го вида ионов  $\mathbf{U}_i$  на величину плотности заряда этих ионов  $\rho_{ei} = C_i e_i$ . Для иона  $i$ -го вида получено [3, с. 24], [5, с. 249]:

$$\mathbf{j}_i = \rho_{ei} u_i \mathbf{E} - e_i D_i \nabla C_i + \rho_{ei} \mathbf{v} = \rho_{ei} u_i \mathbf{E} - D_i \nabla \rho_{ei} + \rho_{ei} \mathbf{v} = \mathbf{j}'_i + \rho_{ei} \mathbf{v}, \quad (9)$$

$$\mathbf{j}'_i = \rho_{ei} u_i \mathbf{E} - D_i \nabla \rho_{ei} = \sigma_i \mathbf{E} - D_i \nabla \rho_{ei}, \quad (9a)$$

Для совокупной плотности тока с учетом ионов всех типов суммирование последних уравнений дает:

$$\mathbf{j} = \sum_{i=1}^N \mathbf{j}_i = \sum_{i=1}^N (\rho_{ei} u_i \mathbf{E} - D_i \nabla \rho_{ei} + \rho_{ei} \mathbf{v}) = \mathbf{j}' + \rho_e \mathbf{v}, \quad (10)$$

$$\mathbf{j}' = \sum_{i=1}^N (\rho_{ei} u_i \mathbf{E} - D_i \nabla \rho_{ei}) = \sigma \mathbf{E} - \sum_{i=1}^N D_i \nabla \rho_{ei} \quad (10a)$$

где  $\rho_e = \sum_{i=1}^N \rho_{ei}$  - совокупная плотность заряда в

жидкости;  $\sigma_i = \rho_{ei} u_i$  и  $\sigma = \sum_{i=1}^N \rho_{ei} u_i$  - парциальная и полная удельная проводимости соответственно. В

(9а), (10а)  $\mathbf{j}'_i$  и  $\mathbf{j}'$  соответственно парциальная и совокупная часть плотности тока, равная сумме токов проводимости и токов, вызванных диффузией ионов;  $\rho_{ei}\mathbf{v}$  и  $\rho_e\mathbf{v}$  - их конвективная часть.

Уравнения типа (9)-(10) носят название соотношения Нернста-Планка (см., например, [6, с. 157]).

Далее, допуская наличие в жидкости только пары ионов одинаковой валентности, но разного знака, запишем для них выражение (10) для плотности тока не подразумевая выполнения условия электронейтральности:

$$\mathbf{j} = \sum_{i=1}^2 (\rho_{ei} u_i \mathbf{E} - D_i \nabla \rho_{ei} + \rho_{ei} \mathbf{v}) = (\rho_e^+ u_1 - \rho_e^- |u_2|) \mathbf{E} - (D_1 \nabla \rho_e^+ - D_2 \nabla \rho_e^-) + (\rho_e^+ + \rho_e^-) \mathbf{v}, \quad (11)$$

Как видно, конвективная составляющая плотности тока отлична от нуля.

В случае выполнения условия электронейтральности  $\rho_e^+ = -\rho_e^-$  из (11) следует

$$\mathbf{j} = \rho_e^+ (u_1 + |u_2|) \mathbf{E} - (D_1 \nabla \rho_e^+ - D_2 \nabla \rho_e^-) = \mathbf{j}', \quad (12)$$

В этом случае конвективная составляющая тока пропадает. Если равны и концентрации ионов  $C_1 = C_2 = C$ , и коэффициенты диффузии  $D_1 = D_2$ , то выпадает и диффузионная составляющая плотности тока и остается только ток проводимости

$$\mathbf{j} = \rho_e^+ (u_1 + |u_2|) \mathbf{E} = \sigma \mathbf{E}.$$

В случае наличия ДЭС электронейтральность нарушается [5, с. 247], [6, § 8.3], что влечет за собой неравенства концентраций  $C_i^+ \neq C_i^-$  и плотностей зарядов  $\rho_i^+ \neq \rho_i^-$ .

Тогда для вычисления функции плотности тока  $\mathbf{j}$  необходимо пользоваться общим выражением (11). Те же рассуждения справедливы при наличии в жидкости произвольного числа пар ионов.

*Коррекция уравнений (3) и (5).* Вначале приведем ЭГД-систему из [3, часть I, с. 24, 81],

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}, \quad (1а)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (2а)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T = \chi \Delta T + \frac{\mathbf{E} \cdot \mathbf{j}'}{\rho c_p}, \quad (3а)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad (4а)$$

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}' + \rho_e \mathbf{v}, \quad \mathbf{j}' = \sigma \mathbf{E} - \sum_{i=1}^N D_i \nabla \rho_{ei}, \quad \sigma = \sum_{i=1}^N \rho_{ei} u_i, \quad (5а)$$

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E} - \frac{\varepsilon_0}{2} E^2 \nabla \varepsilon + \frac{\varepsilon_0}{2} \nabla \left( E^2 \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T, \quad (7а)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \varepsilon_0 \nabla \cdot \varepsilon \mathbf{E} = \rho_e, \quad (13)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{j}' + \frac{\partial \rho_e}{\partial t} = 0. \quad (14)$$

Сравнение этой системы с системой (1)-(7) показывает совпадение уравнений (1) и (1а), (2) и (2а), (4) и (4а), (7) и (7а). Уравнение (3а) отличается от (3) наличием дополнительного источника Джоулева тепла в виде плотности тока, вызванной

диффузией зарядов  $\left( -\sum_{i=1}^N D_i \nabla \rho_{ei} \right)$ . Отличаются также

по форме записи выражения (5) и (5а) для плотности тока. Выражение (6)  $\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$  представляется неверным в общем случае, т.к. дивергенция от плотности тока  $\nabla \cdot \mathbf{j}$  (5), (5а) при потенциальном поле

$\mathbf{E}$  (см. (4а)) в общем случае нулю не равна. В [3, часть I, с., 81] добавлены уравнения Пуассона (13) и уравнение непрерывности (14). Уравнение (14) представляется избыточным, т.к. применительно к поставленной в работе задаче не используется.

На основании изложенного выше может быть записана искомая ЭГД-система, учитывающая электроосмотические эффекты.

*ЭГД-система применительно к электроосмотическим явлениям.*

В искомую систему должны быть включены уравнения (1а)-(5а), (7а) и (13). Уравнение теплопроводности (3а) должно быть откорректировано с учетом наличия ДЭС, после чего можно записать искомую ЭГД-систему в окончательном виде

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}, \quad (15)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (16)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T = \chi \Delta T + \frac{\mathbf{E} \cdot (\mathbf{j}' + \alpha \rho_e \mathbf{v})}{\rho c_p}, \quad (17)$$

$$\alpha = \begin{cases} 0, & \text{вне ДЭС} \\ 1, & \text{внутри ДЭС} \end{cases}.$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad (18)$$

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}' + \rho_e \mathbf{v}, \quad \mathbf{j}' = \sigma \mathbf{E} - \sum_{i=1}^N D_i \nabla \rho_{ei}, \quad \sigma = \sum_{i=1}^N \rho_{ei} u_i, \quad (19)$$

$$\mathbf{f} = \rho_e \mathbf{E} - \frac{\varepsilon_0}{2} E^2 \nabla \varepsilon + \frac{\varepsilon_0}{2} \nabla \left( E^2 \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T, \quad (20)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \varepsilon_0 \nabla \cdot \varepsilon \mathbf{E} = \rho_e. \quad (21)$$

Сформулируем некоторые замечания к ЭГД-системе (15)-(21):

1. Система (15), (16) не является замкнутой, т.к. содержит на четыре уравнения пять неизвестных ( $\rho, p, \mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3)$ ).

2. Уравнение теплопроводности (17) при наличии конвективного члена  $\mathbf{v} \cdot \nabla T$  является связанным, т.е. должно решаться в рамках ЭГД-системы совместно с системой уравнений (15), (16) и добавленным к ним уравнением состояния.

3. Уравнения (18) и (21) определяют электростатический характер рассматриваемого ЭГД-процесса. Подробнее об электростатическом приближении можно посмотреть в [3, глава 1].

4. Уравнение (19) для плотности тока в жидкости выписано в наиболее общем виде. В случае электронейтральности  $\rho_e = 0$  выпадает

конвективная составляющая  $\rho_e \mathbf{V}$ , а в случае однородной концентрации выпадает диффузионная составляющая.

5. Сила  $\mathbf{f}$  в (20), называется электрической или пондеромоторной силой. Составляющая этой силы - сила Кулона  $\rho_e \mathbf{E}$  обычно доминирует, особенно при наличии постоянного электрического поля  $\mathbf{E}$  в проводящих жидких диэлектриках. Второй член – сила, прикладываемая к жидкости при наличии неоднородности электрического поля. Обычно она меньше силы Кулона и может доминировать при приложении переменного электрического поля к изолятору. Третий (потенциальный) член называется стрикционным давлением и может объединяться с гидродинамическим давлением [3, с 124]. Как было показано в [2], при подаче наряду с постоянным электрическим полем и переменного электрического поля, при существенной величине второго и третьего членов в (20) могут возникать кратные (паразитные) гармоника колебаний.

В связи с изложенным выше для замыкания ЭГД-системы (15)-(21) применительно к наличию электроосмотического процесса в жидкости к уже имеющимся уравнениям в качестве недостающих необходимо добавить уравнение состояния

$$p = p(\rho, s), \quad (22)$$

где  $s$  - удельная энтропия, и уравнение стационарности электрохимического потенциала жидкости  $\mu_{\pm}(\mathbf{r})$

$$\nabla \mu_{\pm}(\mathbf{r}) = 0 \Rightarrow k_B T \nabla \ln \left( \frac{c_{\pm}(\mathbf{r})}{c_0} \right) = \mp |e| \nabla \phi(\mathbf{r}), \quad (23)$$

Таким образом, ЭГД-система (15)-(23) становится замкнутой и пригодной для решения электроосмотических задач. Введение электрохимического потенциала позволяет при этом избежать решения задачи массопереноса (диффузии). Кроме того (23) позволяет легко находить в приближении Дебая-Хюккеля такие фигурирующие в ЭГД-системе величины, как  $C_{\pm}$ , электроосмотический потенциал  $\phi$  и плотность заряда  $\rho_e$ .

К системе (15)-(23) для ее однозначного решения необходимо добавить начальные и краевые условия, которые широко представлены в специальной литературе по гидродинамике, электрогидродинамике и литературе по электроосмотическим процессам.

### Заключение

В работе получена замкнутая система ЭГД-уравнений для такого специфического ее подраздела как электроосмотические явления. Эта система не содержит уравнения диффузии для поиска поля концентраций ионов, т.к. они могут быть проще рассчитаны в приближении Дебая-Хюккеля. Кроме того, проще рассчитываются электроосмотические потенциалы и плотности зарядов ионов. Наличие в системе уравнения теплопроводности позволяет рассчитывать поле температуры в жидкости, что является крайне необходимым для поддержания необходимого температурного режима при реализации на практике излучателя нового типа (см. [2]).

### Литература

1. Шарфарец Б.П. ... Акустический преобразователь, построенный на использовании электрокинетических явлений. Морские интеллектуальные технологии (в печати)
2. Шарфарец Б.П. Применение системы уравнений электрогидродинамики для математического моделирования нового способа электроакустического преобразования// Научное приборостроение. 2018. Т. 28. № 4. С. 127-134.
3. Electrohydrodynamics. Edited by Antonio Castellanos. Part I. A. Castellanos. Basic Concepts and Equations in Electrohydrodynamics. Pp. 1-82. Part II. Ghakin A.I. Conduction Phenomena in Dielectric Liquids, EHD Models, Linear and Nelinear Effects on the Charged Interface, EHD Pumping of Dielectric Liquids Pp. 83-162. Wien: Springer-Verlag. 1998. 362 p.
4. Болога М.Н., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. Электроконвекция и теплообмен. Кишинев: Штиинца. 1977. 320 с.
5. Ньюмен Дж. Электрохимические системы. М.: Мир. 1977. 464 с.
6. Bruus H. Theoretical Microfluidics. Oxford University Press. 2008. 346 p.
7. Сергеев В.А., Шарфарец Б.П. Об одном новом методе электро-акустического преобразования. Теория, основанная на электрокинетических явлениях. Часть I. Гидродинамический аспект//Научное приборостроение. 2018. Т. 28. № 2. С. 25-35.
8. Шарфарец Б.П., Курочкин В.Е. К вопросу о подвижности частиц и молекул в пористых средах//Научное приборостроение. 2015. Т. 25. № 4. С. 43-55.

### References

1. Sharfarets B.P. ... Akusticheskiy preobrazovatel', postroennyj na ispol'zovanii ehlektrokineticheskikh yavlenij. Morskije intellektual'nye tekhnologii (v pechati)
2. Sharfarets B.P. Primenenie sistemy uravnenij ehlektrogidrodinamiki dlya matematicheskogo modelirovaniya novogo sposoba ehlektroakusticheskogo preobrazovaniya// Nauchnoe priborostroenie. 2018. T. 28. № 4. S. 127-134.
3. Electrohydrodynamics. Edited by Antonio Castellanos. Part I. A. Castellanos. Basic Concepts and Equations in Electrohydrodynamics. Pp. 1-82. Part II. Ghakin A.I. Conduction Phenomena in Dielectric Liquids, EHD Models, Linear and Nelinear Effects on the Charged Interface, EHD Pumping of Dielectric Liquids Pp. 83-162. Wien: Springer-Verlag. 1998. 362 p.
4. Bologa M.N., Grosu F.P., Kozhuhar' I.A. EHlektrokonvekciya i teploobmen. Kishinev: SHtiinca. 1977. 320 s.
5. N'yumen Dzh. EHlektrohimicheskie sistemy. M.: Mir. 1977. 464 s.

- 
6. Bruus H. Theoretical Microfluidics. Oxford University Press. 2008. 346 p.
  7. Sergeev V.A., Sharfarets B.P. Ob odnom novom metode ehlektro-akusticheskogo preobrazovaniya. Teoriya, osnovannaya na ehlektrokineticheskikh yavleniyah. CHast' I. Gidrodinamicheskij aspekt//Nauchnoe priborostroenie. 2018. T. 28. № 2. S. 25-35.
  8. Sharfarets B.P., Kurochkin V.E. K voprosu o podvizhnosti chastic i molekul v poristyh sredah//Nauchnoe priborostroenie. 2015. T. 25. № 4. S. 43-55.

УДК 534.83.; 629.5

## О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО АКУСТИЧЕСКОГО РЕСУРСА КОРАБЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

**Валентин Павлович Щеголихин**

доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник  
НИИ (кораблестроения и вооружения) ВМФ ВУНЦ ВМФ «ВМА»  
190013, Санкт-Петербург, ул. Чапаева, 30  
e-mail: chegolihin@yandex.ru

**Сергей Васильевич Горин**

доктор технических наук, доцент, доцент кафедры физики  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: fizika@smtu.ru

**Вячеслав Львович Маслов**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: fizika@smtu.ru

**Дмитрий Владимирович Никущенко**

доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: science@smtu.ru

**Александр Иванович Сетин**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой морских информационных систем и технологий  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: alset3103@rambler.ru

### Аннотация

В статье изложена возможность расчетного определения значений остаточного акустического ресурса корабельных машин и механизмов в период их эксплуатации с использованием бортовых информационно-измерительных комплексов виброакустического самоконтроля. Представлены расчетные зависимости и изложен порядок измерения и расчета остаточного акустического ресурса. Показано, что использование данного алгоритма в составе программного обеспечения существующих и перспективных бортовых информационно-измерительных комплексов должно существенно расширить возможности виброакустического контроля корабельного оборудования, машин и механизмов за счет выявления начала деструктивных процессов и недопущения превышения уровнями спектральных составляющих своих «паспортных» значений или эксплуатационной нормы в одной или нескольких спектральных полосах частот. Работа корабельных информационно-измерительных комплексов в режиме определения остаточного акустического ресурса должна осуществляться строго на одном и том же режиме движения и работы технических средств корабля, соблюдение параметров режима должно контролироваться корабельной системой управления техническими средствами. Особенно эффективно, предложенная выше, методика определения остаточного акустического ресурса будет работать в том случае, когда в бортовых информационно-измерительных комплексах предварительно реализованы алгоритм паспортизации виброакустического состояния корабельных механизмов и алгоритм выявления «акустически неисправных» механизмов в энергетических отсеках корабля.

**Ключевые слова:** Виброакустическая характеристика, корабельный механизм, спектральные составляющие, информационно-измерительный комплекс, режимы работы, уровни шума, остаточный акустический ресурс.

## REGARDING THE POSSIBILITY OF DETERMINING THE RESIDUAL ACOUSTIC RESOURCE OF SHIP MECHANISMS

**Valentin P. Shchegolikhin**

Dr.Sci.Tech, Senior Researcher, Chief Researcher  
Research Institute (shipbuilding and armament) of the Navy, Military Educational and Scientific Center of the Navy  
"Naval Academy" 190013, St. Petersburg, st. Chapaeva, 30  
e-mail: chegolihin@yandex.ru

**Sergey V. Gorin**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics

St. Petersburg State Maritime Technical University 190121 , St. Petersburg, st. Lotsmanskaya, 3  
e-mail: fizika@smtu.ru

**Vyacheslav L. Maslov**

Dr.Sci.Tech, Professor, Professor of the Physics Department

St. Petersburg State Maritime Technical University 190121 , St. Petersburg, st. Lotsmanskaya, 3  
e-mail: fizika@smtu.ru

**Dmitry V. Nikuschenko**

Dr.Sci.Tech, Professor, Vice Rector for Scientific Studies

St. Petersburg State Maritime Technical University 190121 , St. Petersburg, st. Lotsmanskaya, 3  
e-mail: science@smtu.ru

**Alexander I. Setin**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Head of the Department of Marine Information Systems and Technologies

St. Petersburg State Maritime Technical University 190121 , St. Petersburg, st. Lotsmanskaya, 3  
e-mail: alset3103@rambler.ru

**Abstract**

The article describes the possibility of calculating the values of the residual acoustic resource of ship machinery and mechanisms during their operation using onboard information and measuring systems of vibroacoustic self-control. The calculated dependencies are presented and the procedure for measuring and calculating the residual acoustic resource is presented as well. It is shown that the use of this algorithm as part of existing and future on-board information and measurement systems software should significantly expand the capabilities of vibroacoustic control of shipboard equipment, machines and mechanisms by identifying the onset of destructive processes and preventing the spectral components from exceeding their "certified" values or operational life standard in one or more spectral frequency bands. The operation of shipboard information and measuring systems in the mode of determining the residual acoustic resource must be carried out strictly in the same mode of motion and operation of the ship's hardware, the compliance with the mode parameters must be monitored by the ship's control system. The above proposed method for determining the residual acoustic resource will work especially effectively when the onboard information and measurement systems are tentatively implemented an algorithm for certification of the vibro-acoustic state of ship mechanisms and an algorithm for identifying "acoustically faulty" mechanisms in the ship's power-generating compartments.

**Keywords:** Vibroacoustic characteristic, ship mechanism, spectral components, information-measuring system, operating modes, noise levels, residual acoustic resource.

**Введение**

Известно, что вибрация является одним из основных параметров, определяющих техническое состояние корабельного оборудования. Опыт использования

корабельных технических средств показывает, что изменения виброакустических характеристик (ВАХ) механизмов в процессе их эксплуатации имеют тенденцию к возрастанию (рис.1).

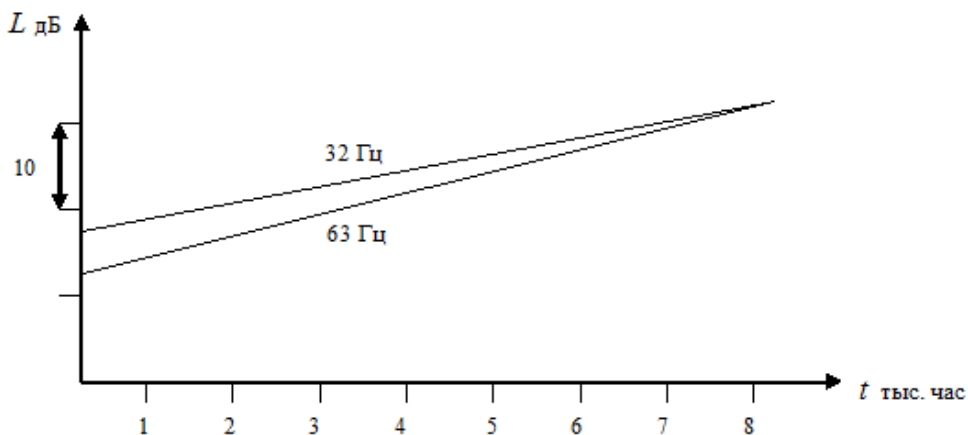


Рис. 1. Изменение уровней ВАХ циркуляционного насоса типа ЭЦ-11 на частотах 32 Гц и 63 Гц за период наработки 8 тыс. час

Таким образом, одним из основных путей поддержания виброакустических характеристик корабельного оборудования в пределах установленных норм является ведение систематического контроля за уровнями ВАХ механизмов в течение всего периода эксплуатации.

Эффективное решение указанной задачи возможно только с использованием бортовых информационно-измерительных комплексов (ИИК) виброакустического самоконтроля. Аппаратура

такого типа представляет собой автоматизированную систему состоящую из вибропреобразователей, устанавливаемых на механизмах, а также устройств измерения, анализа, обработки и регистрации [1].

Следует отметить, что одним из важнейших критериев оценки пригодности контролируемого механизма к его дальнейшей эксплуатации, является «остаточный акустический ресурс», то есть время, оставшееся от последнего измерения до момента



превышения текущими уровнями спектра ВАХ, своих «паспортных» значений или эксплуатационной нормы ВАХ.

В статье рассмотрена возможность практического использования бортового ИИК для решения задачи по определению остаточного акустического ресурса (ОАР) корабельных механизмов.

**1. Теоретические обоснования метода**

Будем считать, что уровни спектральных составляющих ВАХ в функции времени эксплуатации имеют зависимость вида:

$$L_{ki} = \alpha_k \cdot t_i + b_k, \tag{1}$$

где  $L_{ki}$  – уровень  $k$ -й спектральной составляющей;  $\alpha_k, b_k$  – коэффициенты регрессии, определяются из [2]:

$$\alpha_k = \frac{n \cdot \sum_1^n L_{ki} \cdot t_i - \sum_1^n L_{ki} \cdot \sum_1^n t_i}{n \cdot \sum_1^n L_{ki}^2 - \left( \sum_1^n L_{ki} \right)^2}, \tag{2}$$

$$b_k = \frac{\sum_1^n L_{ki}^2 \cdot \sum_1^n t_i - \sum_1^n L_{ki} \cdot \sum_1^n L_{ki} \cdot t_i}{n \cdot \sum_1^n L_{ki}^2 - \left( \sum_1^n L_{ki} \right)^2}.$$

Тогда, величина ОАР  $t_k^{ap}$  для  $k$ -й спектральной составляющей ВАХ контролируемого механизма будет определяться из выражения:

$$t_k^{ap} = \frac{L_{пк} - b_k}{\alpha_k} - t_{ki}, \tag{3}$$

где  $L_{пк}$  – паспортный уровень  $k$ -й спектральной составляющей;  $t_{ki}$  – время предыдущего измерения.

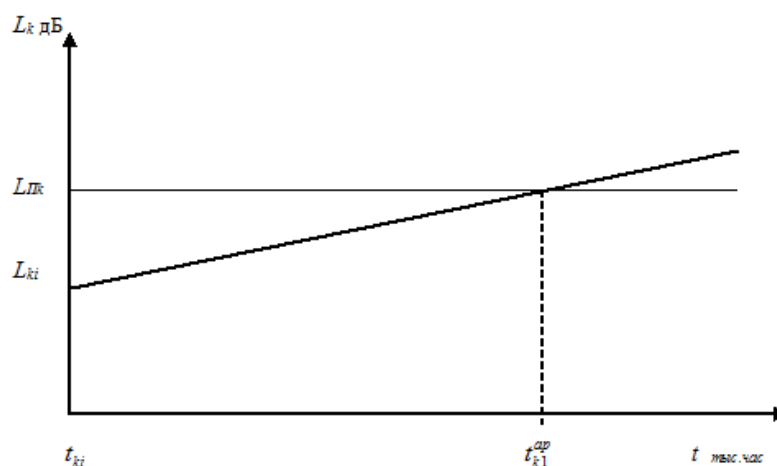


Рис. 2. Зависимость уровня  $k$ -й спектральной составляющей ВАХ в функции времени эксплуатации

Значения  $t_k^{ap}$  для других спектральных составляющих контролируемого диапазона частот определяются аналогично. Результаты оценки могут

С целью определения фактических значений ОАР в период эксплуатации механизма бортовым ИИК производятся измерения текущих спектров ВАХ в фиксируемые моменты времени  $t_j$ .

В результате, в блоке памяти ИИК должны формироваться матрица уровней  $L_1$  и вектор времени  $T_1$  размерности  $(m \times n)$  и  $(1 \times n)$ , соответственно:

$$L_1 = \begin{pmatrix} L_{11}, L_{12}, \dots, L_{1m} \\ L_{21}, L_{22}, \dots, L_{2m} \\ \dots \\ L_{n1}, L_{n2}, \dots, L_{nm} \end{pmatrix}, \quad T_1 = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \dots \\ t_j \dots \\ \dots \\ t_n \end{pmatrix}, \tag{4}$$

где  $m$  – число спектральных составляющих, а  $n$  – объём выборки ( $n \approx 20$ ).

Используя зависимости (1) – (3), а также данные (4) вычисляются значения  $t_{k1}^{ap}$  для всех  $m$  спектральных составляющих.

**2. Методики определения остаточного акустического ресурса**

Значение  $t_{k1}^{ap}$  определяется по точке пересечения прямой, характеризующей «паспортный» уровень  $L_{пк}$  и наклонной прямой, характеризующей зависимость уровня  $k$ -й спектральной составляющей в функции времени эксплуатации.

На рис. 2 представлена зависимость уровня  $k$ -й спектральной составляющей в функции времени эксплуатации.

быть представлены в виде спектра значений  $t_k^{ap}$  во всем контролируемом диапазоне частот.

В процессе дальнейшей эксплуатации механизма через заданные интервалы времени  $\Delta t$ , бортовым

ИИК должны формироваться матрицы уровней  $L_j$  и вектора времени  $T_j$  вида:

$$L_2 = \begin{pmatrix} L_{11}, L_{12}, \dots, L_{1m} \\ L_{21}, L_{22}, \dots, L_{2m} \\ \dots \\ L_{n1}, L_{n2}, \dots, L_{nm} \end{pmatrix}, \quad T_2 = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \dots \\ t_n \end{pmatrix},$$

$$L_j = \begin{pmatrix} L_{11}, L_{12}, \dots, L_{1m} \\ L_{21}, L_{22}, \dots, L_{2m} \\ \dots \\ L_{n1}, L_{n2}, \dots, L_{nm} \end{pmatrix}, \quad T_j = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \dots \\ t_n \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$L_p = \begin{pmatrix} L_{11}, L_{12}, \dots, L_{1m} \\ L_{21}, L_{22}, \dots, L_{2m} \\ \dots \\ L_{n1}, L_{n2}, \dots, L_{nm} \end{pmatrix}, \quad T_p = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \dots \\ t_n \end{pmatrix},$$

где  $p$  – количество матриц  $L_j$  и векторов  $T_j$ , полученных в период эксплуатации механизма.

Используя зависимости (1) – (3), а также данные (5) значения  $t_{ki}^{ap}$  аналогично вычисляются для всех  $m$  спектральных составляющих.

**Заключение**

Таким образом, использование данного алгоритма в составе программного обеспечения существующих и перспективных бортовых ИИК должно существенно расширить возможности виброакустического контроля современного корабельного оборудования за счет диагностирования начала деструктивных процессов и недопущения возможности превышения уровнями спектральных составляющих своих «паспортных» значений. Особенно эффективно, предложенная выше, методика определения остаточного акустического ресурса будет работать в том случае, когда в бортовых информационно-измерительных комплексах предварительно реализованы алгоритм паспортизации виброакустического состояния корабельных механизмов [3] и алгоритм выявления «акустически неисправных» механизмов в энергетических отсеках корабля [4].

**Литература**

1. Комплекс измерительный информационный М052.01. Технические условия. ГИЕШ. 411711.001. ТУ. 2005.
2. Быховский Г.Е. и др. Гидроакустические измерения. – Л.: Судостроение, 1971.
3. Щеголихин В.П. Алгоритм паспортизации виброакустического состояния корабельных механизмов. – СПб.: Судостроение, № 2, 2017, с. 41-44.
4. Щеголихин В.П. Алгоритм выявления «акустически неисправных» механизмов в энергетических отсеках корабля. – СПб.: Судостроение, № 5, 2018, с.49-52.

**References**

1. Kompleks izmeritel'nyy informatsionnyy M052.01. Tekhnicheskie usloviya. GIESh. 411711.001. TU. 2005.
2. Bykhovskiy G.E. i dr. Gidroakusticheskie izmereniya. L.: Sudostroenie, 1971.
3. Shchegolikhin V.P. Algoritm pasportizatsii vibroakusticheskogo sostoyaniya korabel'nykh mekhanizmov. SPb.: Sudostroenie, № 2, 2017, p. 41-44.
4. Shchegolikhin V.P. Algorithm to reveal «acoustic-faulty» mechanisms in ship power compartments. SPb.: Shipbuilding, № 5, 2018. P. 49-52.

УДК 534.83.; 629.5

## АЛГОРИТМ ВЫЯВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ПОВЫШЕННОЙ ВИБРОАКТИВНОСТИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОТСЕКАХ КОРАБЛЯ

### Валентин Павлович Щеголихин

доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник  
НИИ (кораблестроения и вооружения) ВМФ ВУНЦ ВМФ «ВМА»  
190013, Санкт-Петербург, ул. Чапаева, 30  
e-mail: chegolihin@yandex.ru

### Сергей Васильевич Горин

доктор технических наук, доцент, доцент кафедры физики  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
e-mail: fizika@smtu.ru

### Василий Семёнович Майоров

доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»  
196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44  
e-mail: fizika@smtu.ru

### Дмитрий Владимирович Никущенко

доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
e-mail: science@smtu.ru

### Александр Иванович Сетин

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой морских информационных систем и технологий  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
e-mail: alset3103@rambler.ru

### Аннотация

Бортовые вычислительные комплексы виброакустического контроля служат для выявления «акустически неисправных» судовых машин и механизмов. Эксплуатация бортовых комплексов в реальных условиях показала, что их показания могут искажаться наведенными уровнями вибрации и воздушного шума, создаваемыми соседними машинами и механизмами. В данной работе предлагается алгоритм выявления источников повышенной виброактивности и шумоизлучения машин и механизмов, находящихся в отсеках корабля. Реализация данного алгоритма в составе программного обеспечения существующих бортовых информационно-измерительных комплексов виброакустического контроля существенно расширит их технические возможности в решении задач выявления машин и механизмов, вносящих основной вклад в повышенное шумоизлучение корабля. Особенно большой технический эффект от применения данного алгоритма должен проявляться при его совместном использовании с алгоритмом выявления «акустически неисправных» судовых машин и механизмов в энергетических системах корабля. При этом предполагается, что ранее в системе реализован алгоритм паспортизации виброакустического состояния машин и механизмов, в основу работы которого положена возможность автоматического сопоставления уровней «паспортного» спектра вибрации или эксплуатационной нормы в одной или нескольких спектральных полосах частот с уровнями реальных спектров, контролируемого объекта.

**Ключевые слова:** Виброакустический контроль, наведенные вибрации, измерение вибрации, спектральные полосы частот, микрофон, коэффициент корреляции, техническая диагностика, алгоритм.

### Введение

Известно, что виброакустическое состояние корабельного оборудования и, соответственно, шумоизлучение корабля в процессе плавания могут подвергаться существенным изменениям, обусловленным как различными режимами движения и работы энергетической установки, так и изменениями виброакустических характеристик механизмов, систем, средств акустической защиты, обусловленными влиянием всевозможных

эксплуатационных факторов, а также износом самого оборудования.

Необходимость проведения постоянного контроля за шумоизлучением корабля и виброакустическим состоянием его оборудования в период похода потребовало разработки и создания бортовых информационно-измерительных комплексов виброакустического контроля.

Существующие в настоящее время бортовые информационно-измерительные комплексы (ИИК) представляют собой стационарно устанавливаемые на кораблях автоматизированные, измерительно-

анализирующие системы, состоящие из вибропреобразователей, гидрофонов и микрофонов, а также устройств измерения, анализа, обработки и регистрации [1].

Основным назначением бортовых ИИК является постоянный контроль за текущим акустическим состоянием машин и механизмов в энергетических отсеках корабля и выявление источников повышенной виброактивности.

### 1. Постановка задачи

Принято считать, что если в одном из работающих механизмов появился скрытый дефект, тогда ИИК должен обнаружить в точке контроля, расположенной на данном механизме, превышение уровня «паспортного» спектра вибрации или эксплуатационной нормы в одной или нескольких спектральных полосах частот (рис. 1). Для выполнения этой процедуры разработан алгоритм паспортизации виброакустического состояния механизмов [2].

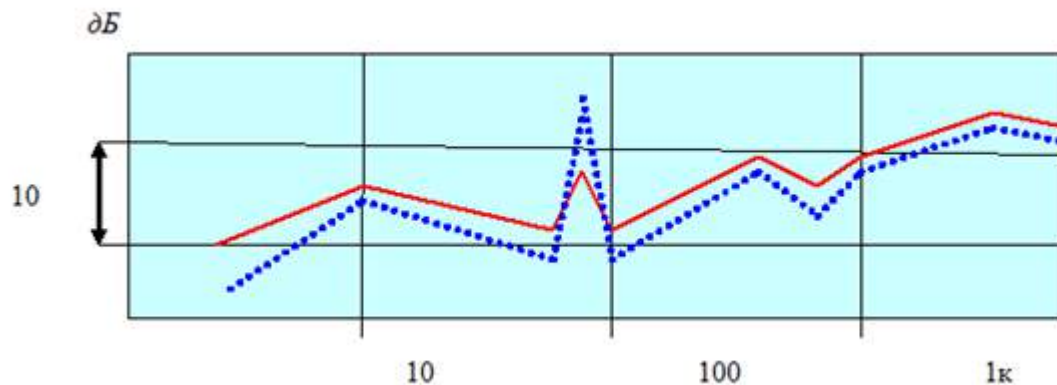


Рис. 1. Спектры вибрации корабельного механизма: — «паспортная спектрограмма», ..... – «текущая» спектрограмма

В данной статье изложен алгоритм функционирования бортового ИИК при решении задачи по выявлению в энергетических отсеках механизмов, являющихся источниками повышенного шумоизлучения корабля. Рассмотрим бортовой ИИК, состоящий из системы вибропреобразователей, установленных в точках

контроля на механизмах, системы микрофонов, установленных в энергетических отсеках, а также устройств измерения, анализа, обработки и регистрации. Структурная схема бортового ИИК показана на рис. 2.

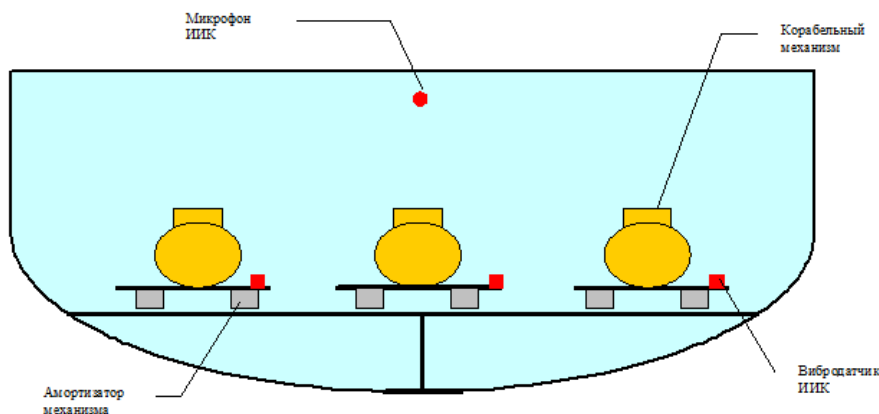


Рис. 2. Структурная схема бортового информационно-измерительного комплекса

Работа бортового ИИК заключается в следующем. Пусть в спектрах воздушного шума (ВШ), измеренных системой бортовых микрофонов 1, 2, ..., b, ..., q ИИК, расположенных в энергетическом отсеке корабля, на спецификационном режиме движения выявлено превышение «паспортных» уровней в k-й спектральной полосе  $\Delta L_{1k}^{ВШ}, \Delta L_{2k}^{ВШ}, \dots, \Delta L_{bk}^{ВШ}, \dots, \Delta L_{qk}^{ВШ}$ .

Для определения зоны интенсивного шумоизлучения в отсеке в данной спектральной

полосе, ИИК определяет микрофон с максимальным уровнем  $L_{bk}^{ВШ} = \max$ .

С целью выявления источника превышения ВШ, обусловленного изменением виброакустических характеристик (ВАХ) работающего оборудования, ИИК производит последовательный опрос всех вибропреобразователей на работающих механизмах 1, 2, ..., a, ..., m.

Очевидно, что если причиной превышения ВШ в отсеке является какой-либо из контролируемых механизмов, тогда на нём в обязательном порядке должно быть обнаружено превышение уровня его «паспортного» спектра ВАХ в той же, что и в спектре воздушного шума  $k$ -й спектральной полосе.

Однако, в реальных условиях эксплуатации, процесс выявления механизма, обуславливающего превышение «паспортного» спектра ВШ, может осложняться наличием на соседних механизмах в тех же спектральных полосах частот наведенных от него уровней. Указанное обстоятельство обусловлено насыщенностью оборудования отсека, блочной компоновкой механизмов, креплением механизмов без амортизаторов к общей раме или блоку и т.д.

В результате, ИИК может выявить целый ряд «ложных источников». Кроме того, нельзя исключать и вероятность появления превышений ВАХ на этих механизмах, в тех же спектральных полосах частот, но вызванных иными причинами.

**2. Методика оценки коэффициентов корреляции**

С целью установления принадлежности выявленных в  $k$ -й спектральной полосе превышений уровней ВАХ на механизмах  $\Delta L_{1k}^{BAX}, \Delta L_{2k}^{BAX}, \dots, \Delta L_{ak}^{BAX}, \dots, \Delta L_{mk}^{BAX}$ , а также превышения уровня ВШ на микрофоне  $\Delta L_{bk}^{BШ} = \max$  к единому источнику, производится попарная оценка степени линейной взаимосвязи уровней  $\Delta L_{bk}^{BШ} = \max$  и  $L_{1k}^{BAX}, L_{2k}^{BAX}, \dots, L_{ak}^{BAX}, \dots, L_{mk}^{BAX}$ .

В качестве критерия этой оценки используются расчетные значения выборочных коэффициентов корреляции  $R_{bak}^{BB}$  для  $k$ -х спектральных составляющих уровней воздушного шума в точке с  $\Delta L_{bk}^{BШ} = \max$  и уровней вибрации  $L_{1k}^{BAX}, L_{2k}^{BAX}, \dots, L_{ak}^{BAX}, \dots, L_{mk}^{BAX}$  в точках на механизмах, где были обнаружены превышения [3]:

$$R_{bak}^{BB} = \frac{\sum_{i=1}^n (L_{ibk}^{BШ} - \bar{L}_{bk}^{BШ}) \cdot (L_{iak}^{BAX} - \bar{L}_{ak}^{BAX})}{(n-1) \cdot S_{bk}^{BШ} \cdot S_{ak}^{BAX}}, \quad (1)$$

где  $\bar{L}_{bk}^{BШ} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n L_{ibk}^{BШ}$ ,  $\bar{L}_{ak}^{BAX} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n L_{iak}^{BAX}$ ,

$$S_{bk}^{BШ2} = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (L_{ibk}^{BШ} - \bar{L}_{bk}^{BШ})^2,$$

$$S_{ak}^{BAX2} = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (L_{iak}^{BAX} - \bar{L}_{ak}^{BAX})^2; \quad n - \text{объем выборки};$$

$m$  - количество контролируемых механизмов в отсеке;  $L_{iak}^{BAX}$  - уровень  $k$ -й спектральной составляющей 1/3-октавного спектра вибрации в  $i$ -м измерении на  $a$ -м механизме;  $\bar{L}_{ak}^{BAX}$  - выборочное среднее уровней  $k$ -й спектральной составляющей 1/3-октавного спектра вибрации на  $a$ -м механизме;  $L_{ibk}^{BШ}$  - уровень  $k$ -й спектральной составляющей 1/3-октавного спектра воздушного шума в  $i$ -м

измерении на  $b$ -м микрофоне;  $\bar{L}_{bk}^{BШ}$  - выборочное среднее уровней  $k$ -й спектральной составляющей 1/3-октавного спектра воздушного шума на  $b$ -м микрофоне;  $S_{ak}^{BAX2}$  - выборочная дисперсия уровней  $k$ -й спектральной составляющей 1/3-октавного спектра вибрации на  $a$ -м механизме;  $S_{bk}^{BШ2}$  - выборочная дисперсия уровней  $k$ -й спектральной составляющей 1/3-октавного спектра воздушного шума на  $b$ -м микрофоне.

Полученные расчетные значения  $R_{bak}^{BB}$  сведем в таблицу 1.

Таблица 1

**Значения коэффициентов корреляции в различных точках контроля**

Точка контрол я ВШ	Точки контроля ВАХ					
	1	2	...	a	...	m
b	$R_{b1k}^{BB}$	$R_{b2k}^{BB}$	...	$R_{bak}^{BB}$	...	$R_{bmk}^{BB}$

В результате анализа таблицы 1 выявляются механизмы, имеющие с воздушным шумом в отсеке высокую корреляционную связь  $R_{bak}^{BB} \approx 1$ .

Известно, что уровень наведенной вибрации на любом механизме, за счет потерь при прохождении акустической энергии от источника, всегда будет ниже уровня, измеренного на самом источнике, поэтому ИИК производит среди механизмов, имеющих корреляционную связь, поиск вибропреобразователя с максимальным уровнем в  $k$ -й спектральной полосе  $L_{ak}^{BAX} = \max$ .

Таким образом, необходимым и достаточным условием выявления виброактивного механизма, обуславливающего превышение уровня ВШ в  $k$ -й спектральной составляющей, является  $R_{bak}^{BB} \approx 1$  и  $L_{ak}^{BAX} = \max$ .

**3. Алгоритм выявления источников повышенной виброактивности**

Исходя из вышеизложенного следует, что ИИК при решении задачи по выявлению в энергетических отсеках корабля механизмов - источников повышенной виброактивности, должен функционировать по следующему алгоритму:

1. На спецификационном режиме движения корабля производится контроль воздушного шума в отсеке и выявляются микрофоны, на которых обнаружены превышения «паспортных» уровней в  $k$ -й спектральной полосе  $\Delta L_{1k}^{BШ}, \Delta L_{2k}^{BШ}, \dots, \Delta L_{bk}^{BШ}, \dots, \Delta L_{mk}^{BШ}$ .

2. Определяется микрофон с максимальным уровнем в  $k$ -й спектральной полосе  $L_{bk}^{BШ} = \max$ .

3. Производится контроль ВАХ механизмов и выявляются точки контроля (вибродатчики), на которых обнаружены превышения уровней

«паспортных» спектров в той же  $k$ -й спектральной полосе  $\Delta L_{1k}^{BAX}, \Delta L_{2k}^{BAX}, \dots, \Delta L_{ak}^{BAX}, \dots, \Delta L_{mk}^{BAX}$ .

4. Производится попарная оценка степени линейной взаимосвязи уровней  $k$ -х спектральных составляющих в точках контроля на механизмах, где были обнаружены превышения и уровнем  $L_{bk}^{BШ} = \max$  на микрофоне, путем расчетного определения значений  $R_{bak}^{BB}$ .

5. Определяются точки контроля (вибродатчики) на которых  $R_{bak}^{BB} \approx 1$ .

6. Находится вибропреобразователь (механизм), где  $R_{bak}^{BB} \approx 1$  и  $L_{ak}^{BAX} = \max$ .

После выявления виброактивного механизма - источника повышенного воздушного шума в энергетическом отсеке, ИИК в режиме «Диагностика»

производит техническое диагностирование данного механизма, с целью поиска причин превышения и выдачи рекомендаций личному составу корабля по их устранению.

#### Заключение

Следует отметить, что использование данного алгоритма в составе программного обеспечения существующих бортовых ИИК должно существенно расширить их технические возможности в решении задач выявления механизмов, обуславливающих повышенное шумоизлучение корабля.

Особенно большой технический эффект от применения данного алгоритма должен проявляться при его совместном использовании с алгоритмом выявления «акустически неисправных» машин «паспортных уровней» и механизмов в энергетических системах корабля [4].

#### Литература

1. Комплекс измерительный информационный М052.01. Технические условия. ГИЕШ. 411711.001. ТУ. 2005.
2. Щеголихин В.П. Алгоритм паспортизации виброакустического состояния корабельных механизмов. – СПб.: Судостроение, № 2, 2017, с. 41-44.
3. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Изд. «Наука», ГР ФМЛ, 1968, – 288 с.
4. Щеголихин В.П. Алгоритм выявления «акустически неисправных» механизмов в энергетических отсеках корабля. – СПб.: Судостроение, № 5, 2018, с.49-52.

#### References

1. Kompleks izmeritel'nyy informatsionnyy M052.01. Tekhnicheskie usloviya. GIESh. 411711.001. TU. 2005.
2. Shchegolikhin V.P. Algoritm pasportizatsii vibroakusticheskogo sostoyaniya korabel'nykh mekhanizmov. SPb.: Sudostroenie, № 2, 2017, p. 41-44.
3. Pustyl'nik E.I. Statisticheskie metody analiza i obrabotki nablyudeniy. M.: Izd. «Nauka», GR FML, 1968, 288 p.
4. Shchegolikhin V.P. Algorithm to reveal «acoustic-faulty» mechanisms in ship power compartments. SPb.: Shipbuilding, № 5, 2018. P. 49-52.

УДК 534.142.1

**ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ЗВУКА – ТЕРМОФОНЫ: РАСЧЁТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ****Борис Петрович Васильев**

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры физики  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: bp\_vas@mail.ru

**Ксения Васильевна Разрезова**

кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник научно-исследовательской части  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: kv\_neveselova@mail.ru

**Сергей Васильевич Горин**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры физики  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: fizika@smtu.ru

**Герман Андреевич Лебедев**

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: fizika@smtu.ru

**Александр Иванович Сетин**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой морских информационных систем и технологий  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: alset3103@rambler.ru

**Аннотация**

В статье приводятся результаты исследований проволочных и пленочных термофонов различной конфигурации с целью определения их акустических характеристик и направлений возможного практического применения. Представлены основные соотношения и формулы, расчет по которым подтверждается проведенными экспериментальными результатами.

Проводится анализ двустороннего и одностороннего режимов излучения проволочных термофонов. Отмечается, что основным недостатком проволочных термофонов с односторонним излучением является неравномерность их АЧХ, что затрудняет их практическое применение. В двустороннем режиме проволочные термофоны могут успешно использоваться в качестве поршневых источников звука в трубах.

Пленочные термофоны различной формы без теплоизолирующей подложки обладают равномерными, воспроизводимыми акустическими характеристиками, которые можно прогнозировать путем расчета, зная физические константы используемых материалов конструкции термофонов.

Перспективным направлением исследования является использование термофонов в качестве источников излучения звука в жидкую среду. Приводятся результаты исследования излучения пленочного термофона в две жидкости (дистиллированная вода и керосин). По сравнению с излучением в воздух излучение в керосин, например, выше примерно на 20 дБ.

**Ключевые слова** Термофон проволочный и пленочный, активный элемент, переменный электрический ток, несущая пластина, тепловая волна, звуковая волна, излучение в жидкость

**THERMOACOUSTIC SOURCES OF SOUND - THERMOPHONES:  
CALCULATION, DESIGN, APPLICATION PROSPECTS****Boris P. Vasilyev**

PhD in Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Physics  
St. Petersburg State Maritime Technical University 190121, St. Petersburg, st. Lotsmanskaya, 3  
e-mail: bp\_vas@mail.ru

**Ksenia V. Razrezova**

PhD in Physical and Mathematical Sciences, Junior Researcher of the Research Section  
St. Petersburg State Maritime Technical University 190121, St. Petersburg, st. Lotsmanskaya, 3  
e-mail: kv\_neveselova@mail.ru

**Sergey V. Gorin**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Head of the Department of Physics  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: fizika@smtu.ru



**German A. Lebedev**

Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor, Head of Physics Department of  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: fizika@smtu.ru

**Alexander I. Setin**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Head of the Department of Marine Information Systems and Technologies  
St. Petersburg State Maritime Technical University  
190121, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: alset3103@rambler.ru

**Abstract**

The article presents the results of studies of wire and film thermophones of various configurations in order to determine their acoustic characteristics and trends for potential practical application. The basic relations and formulas are presented, the calculation of which is confirmed by the experimental results carried out.

The analysis of bilateral and unilateral radiation modes of wire thermophones is carried out. It is noted that the main disadvantage of wire thermophones with unilateral radiation is the irregularity of their frequency response, which hinders their practical application. In bilateral mode, wire thermophones can be successfully used as piston sound sources in pipes.

Film thermophones of various shapes without a thermally insulating substrate have uniform, reproducible acoustic characteristics that can be predicted by calculating, knowing the physical constants of the materials used for the design of thermophones.

A promising trend of research is the use of thermophones as sources of radiation of sound in a liquid medium. The results of a study of film thermophone radiation in two liquids (distilled water and kerosene) are presented. Compared to radiation to air, radiation to kerosene, for example, is about 20 dB higher.

**Keywords** Wire and film thermophone, active element, alternating electric current, carrier plate, heat wave, sound wave, radiation into liquid

**Введение**

Термоакустические источники звука, термофоны, - это электрические устройства для генерации звука, в основе которых используется термоакустический эффект возбуждения звука поверхностью проводника при пропускании переменного тока. Он состоит из отдельно стоящей электропроводящей пленки на твердой подложке или проволоки. Из-за их простой конструкции могут быть изготовлены термофоны практически произвольной формы и размеров. С конструкцией термофонов, методами их расчёта и некоторыми результатами их испытаний можно познакомиться в книге Л. Беранека [1]. Основы теории излучения звука термофоном разработаны Х.Д. Арнольдом, И.Б. Крэндалом [2] и Э.К. Вентом [3].

**1. Устройство и расчет проволочных термофонов**

В отличие от плёночных термофонов, излучение проволочных термофонов может быть двусторонним и односторонним. Разработаны двусторонние термофоны, практически прозрачные для возбуждения звука в трубах с целью изучения их акустических характеристик [8]. Активный элемент термофона (АЭ) изготовлен из проволоки радиуса  $r_p$ , по которой пропускается переменный ток. Принципиально важным при расчёте акустического излучения термофона является определение амплитуды  $T'_1$  переменного теплового поля. Для этого воспользуемся схемой, показанной на рис. 1.

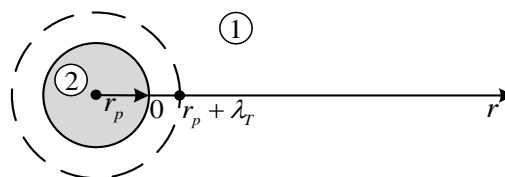


Рис. 1. Схема расчёта амплитуды переменной температуры поверхности проволоки: 1 – пространство, заполненное газом; 2 – вещество, из которого изготовлена проволока;  $\lambda_T$  – длина тепловой волны

Пропускание по АЭ переменного электрического тока с частотой  $f_0$  возбуждает на его поверхности переменное температурное поле  $T'_1(f)$  с удвоенной частотой  $f=2f_0$ , а в среде, окружающей проводник, возникает неоднородная тепловая волна, фронт которой имеет цилиндрическую форму [7]

$$T'_1 = T'_m \sqrt{\frac{r_p}{r_p + r}} \cdot e^{-\frac{r}{\delta_T}} \cos\left(\omega t - \frac{r}{\delta_T}\right), \quad (1)$$

где  $T'_m$  – амплитуда переменной температуры поверхности проволоки,  $\delta_T = \sqrt{2a/\omega}$  – толщина теплового пограничного слоя,  $a = \chi/C_p \rho$  – коэффициент температуропроводности среды,  $C_p$  – удельная теплоёмкость при постоянном давлении,  $\rho$  – плотность газа.

Расчёт амплитуды  $T'_m$  приведен в работе [9] на основании анализа теплового баланса и уравнения теплопроводности

$$T'_m = \frac{p_e}{\ell \sqrt{\beta_e^2 + (\omega \epsilon')^2}}, \quad (2)$$

Здесь:  $\beta_e = \pi \chi \left(1 + \frac{2r_p}{\delta_T}\right)$ ,  $p_e = R_e I_m^2$  – пиковая мощность тепловыделения за счёт джоулевых потерь,  $\ell$  – длина проволоки,  $\epsilon'$  – теплоёмкость единицы длины проволоки,  $\chi$  – коэффициент теплопроводности.

Анализ частотной зависимости  $T'_m(f)$  показывает, что  $T'_m$  быстро убывает и на частотах выше 20 кГц слабо зависит от частоты.

Звуковая волна, вызванная появлением тепловой волны, формируется на расстоянии, равном  $\lambda_{T1}$  от поверхности проволоки. Следовательно, проволока является цилиндрическим источником звука, имеющим радиус излучающей поверхности, равный  $r_p + \lambda_{T1}$ .

Используя (2) вычисляется звуковое давление в дальней зоне ( $k_1 r \gg 6$ ) по формуле [8]

$$p_1 = \frac{k_1 \rho_1 c_1}{2} \cdot Q_0 A_1 \sqrt{\frac{2}{\pi k_1 r}} \cos\left(k_1 r - \frac{\pi}{4}\right), \quad (3)$$

где  $Q_0 = 2\pi(r_p + \lambda_T) U_r$ ,  $U_r$  – амплитуда колебательной скорости.

Результирующий вклад в акустическое поле звукового давления линейной решетки из  $N$  проволочных элементов определяется выражением [8]

$$p_N = p_1 \frac{\sin(k_1 A_1 \sin \varphi)}{k_1 A_1 \sin \varphi} \cdot \frac{\sin N \Delta}{\sin \Delta}, \quad (4)$$

где  $\Delta = k_1 d_1 \sin \varphi / 2$

Формулу (4) можно применять для оценки параметров акустического поля термофона в безграничной среде. Излучение при этом будет двусторонним.

Отметим также, что если расстояние между проводниками удовлетворяет условию  $d \leq 2\delta_{T1}$ , то тепловые волны, возникающие на соседних проводниках, перекрываются. В пространстве выше и ниже проволок, входящих в состав АЭ, формируются практически плоские излучающие поверхности и излучение носит поршневой характер.

В случае одностороннего излучения термофон располагается над твёрдой поверхностью (рис. 2 и рис. 3). Тогда излучающую систему можно рассматривать как линейная база, состоящей из двух источников звука, находящихся на расстоянии  $2h_1$  друг от друга. Действительные и мнимые источники звука такой базы работают синфазно.

Результирующее акустическое поле давления, создаваемого проволочным термофоном, запишется тогда в виде

$$p = 2 p_N \cdot \cos\left(\frac{2\pi h_1}{\lambda_1} \cos \varphi\right). \quad (5)$$

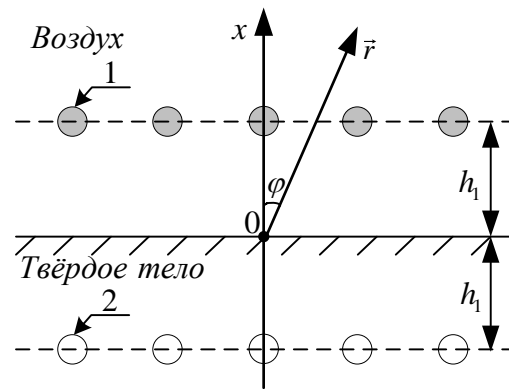


Рис. 2. Схема расчёта параметров акустического поля, создаваемого проволочным термофоном: 1 – действительные источники звука; 2 – мнимые источники звука

На центральной оси термофона ( $\varphi = 0$ ) и тогда из формул (4) и (5) видно, что при фиксированных значениях  $h_1$  изменение частоты сигнала приводит к появлению максимумов и минимумов амплитуды звукового давления. Для того, чтобы избежать наличие этого эффекта необходимо уменьшать величину  $h_1$ . На рис 4 приведены результаты расчета уровня звукового давления, создаваемого термофоном на центральной оси, по формулам (4) и (5) в сравнении с результатами измерений для образца термофона, изображенного на рис. 3. Плоскость элемента заполнена витками нихромовой проволоки, имеющей радиус  $r_p = 50,0$  мкм и  $N = 16$ .

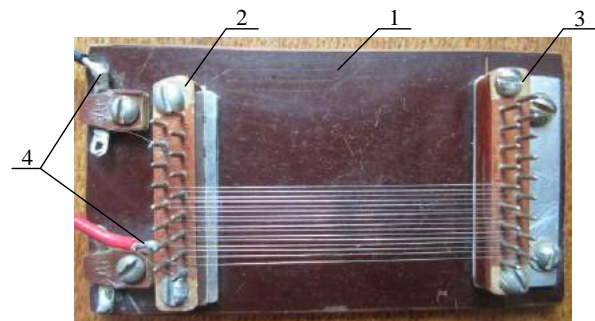


Рис. 3 Фотография устройства для испытаний проволочных термофонов: 1 – несущая пластина; 2, 3 – стойки; 4 – электрические контакты

Сопоставление кривых 1 и 3 показывает, что средние значения измерений примерно на 10 дБ выше расчётных данных для двустороннего излучения. Спектр сигнала, излучаемого проволочным термофоном имеет характерные максимумы и минимумы, наличие которых указывает на то, что каждая проволока, образующая АЭ термофон, излучает звук индивидуально.

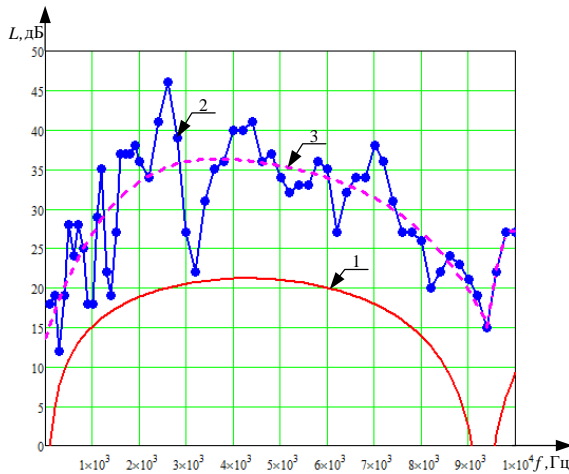


Рис. 4 Частотные зависимости уровня звукового давления: 1 – расчёт; 2 – экспериментальные данные центрального микрофона; 3 – усреднённые значения эксперимента

Проволочный термофон без твёрдой подставки с двусторонним излучением, выполненный в форме спирали и обладающий равномерной АЧХ излучения, использовался для исследования формирования акустических полей в прямых трубах с открытыми торцами [8].

**2. Устройство и расчёт плёночных термофонов**

Структурная схема плёночного термофона представлена на рис. 5. Активный элемент (АЭ) термофона – 1 нанесён на верхнюю поверхность подложки – 2, которая в свою очередь закреплена на верхней поверхности несущей пластины – 3.

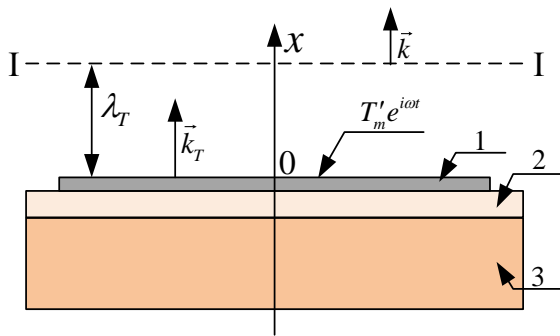


Рис. 5. Структурная схема плёночного термофона: 1 – АЭ; 2 – подложка; 3 – несущая пластина;  $\vec{k}_T$  – неоднородная тепловая волна;  $\lambda_T$  – длина тепловой волны;  $\vec{k}$  – звуковая волна, излучаемая термофоном; I-I – поверхность излучения звука;  $T_m$  – амплитуда переменной температуры поверхности АЭ

АЭ плёночных термофонов обычно формируются в виде очень тонких электропроводящих слоёв, для изготовления которых чаще всего используются металлы и металлические сплавы. Толщина АЭ может составлять от 30 нм до 1,0 мкм. Формы излучающих поверхностей могут быть такими, как это показано на рис. 6.

Для повышения акустической эффективности термофона между его АЭ и поверхностью механической основы вводят теплоизоляционный слой – подложку 2 (см. рис. 5). При изготовлении подложек чаще всего используют пористый кремний или пористые полимеры. Недостаток пористых подложек в том, что теплофизические параметры вещества различных подложек, изготовленных из одного и того же материала, могут сильно отличаться. На современном этапе развития термофонов было решено отказаться от подложек и АЭ формировать непосредственно на поверхности несущей пластины [11-14].

Несущая пластина плёночного термофона 3 обеспечивает ему необходимую механическую прочность. Кроме того, пластина обеспечивает отвод излишков тепла от АЭ, стабилизируя работу термофона. Площадь несущей поверхности пластины делают достаточной для формирования на ней излучающей поверхности термофона. Для изготовления несущих пластин использовались слоистые пластики.

Для обеспечения излучения звука использовался непрерывный режим возбуждения плёночных термофонов, при котором через АЭ пропускался только переменный ток с частотой  $f_0$  и, как следствие этого, на поверхности АЭ возникает переменная температура  $T'_m(f)$ , где  $f=2f_0$ , и в верхнем полупространстве формируется неоднородная тепловая волна

$$T' = T'_m \cdot \exp\left(-\frac{x}{\delta_T}\right) \exp i\left(\omega t - \frac{x}{\delta_T}\right). \quad (6)$$

Амплитуда переменной температуры для плёночных термофонов определяется выражением [9]

$$T'_m = \frac{q_e}{\sqrt{\omega(K_{H1} + K_{H3})}}, \quad (7)$$

где  $K_{H1} = \sqrt{\chi \rho C_p}$ ;  $K_{H3} = \sqrt{\chi_3 \rho_3 C_{p3}}$  – термодинамические параметры сред;  $\chi_3$ ,  $\rho_3$ ,  $C_{p3}$  – соответственно теплопроводность, плотность и удельная теплоёмкость вещества несущей пластины.

Распространение тепловой волны (6) приводит к генерации звуковой волны  $\vec{k}$ , амплитуда колебательной скорости которой может быть рассчитана по формуле

$$U_0 = 0,707 \sqrt{\omega a} \beta_v T'_m, \quad (8)$$

где  $\beta_v$  – коэффициент теплового объёмного расширения среды.

Следует отметить, что амплитуда  $U_{01}$  постоянна по всей излучающей поверхности термофона (см. рис. 5). Тогда звуковое давление вдоль центральной оси термофона будет равно

$$p_1(x) = 2U_0 \rho c \left| \sin\left(\frac{k\alpha_1}{2}\right) \right|, \quad (9)$$

где  $\alpha_1 = \sqrt{(x - \lambda_T)^2 + r_0^2} - x$ ,  $r_0$  – радиус эквивалентной излучающей поверхности,  $\lambda_T = 2\pi\delta_T$ .

Из формулы (7) видно, что для повышения акустической эффективности плёночного термофона, необходимо при изготовлении несущей пластины 3 выбирать материалы, имеющие

минимальное значение термодинамического параметра  $K_{нз}$ . Формулы (7), (8) и (9) позволяют рассчитать основные акустические параметры плёночных термофонов. В работах [11, 14-16]

экспериментально показано, что эти формулы в случаях, когда излучение звуковых волн термофонами происходит в воздух, дают достаточно хорошие результаты.

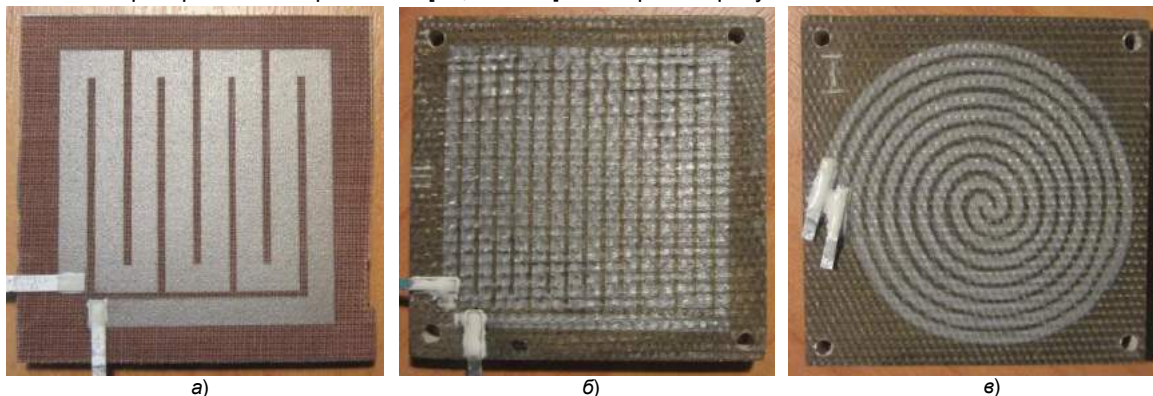


Рис. 6. Изображения плёночных термофонов

### 3. Перспективы практического применения

Если сравнивать характеристики излучения проволочных и пленочных термофонов, то неоспоримым преимуществом обладают пленочные термофоны в качестве источников звука. Они обладают равномерными, воспроизводимыми акустическими характеристиками.

Основным недостатком проволочных термофонов с односторонним излучением, является неравномерность АЧХ (см. рис. 4), что затрудняет их практическое применение.

Проволочный термофон без твёрдой подставки с двусторонним излучением, выполненный в форме спирали и обладающий равномерной АЧХ излучения, использовался для исследования формирования акустических полей в прямых трубах с открытыми торцами [8]. Такой термофон, практически прозрачный для звука, может быть размещен в любой точке внутри трубы.

Перспективным направлением исследования является использование термофонов в качестве источников излучения звука в жидкостях.

С точки зрения физики процессы распространения звуковых волны в газах и жидкостях не отличаются. Поэтому достаточно проверить формулы (7), (8) и (9) для случая излучения звука пленочного термофона в жидкость.

Для предварительной оценки акустических параметров термофонов в качестве жидкостей выбраны вода ( $K_{н1} = 1584 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{Кс}^{0.5})$ ) и керосин ( $K_{н1} = 456 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{Кс}^{0.5})$ ).

АЧХ плёночного термофона, погружённого в керосин, воду и воздух ( $K_{н1} = 1584 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{Кс}^{0.5})$ ), соответственно, показано на рис. 7 [18]. Видно, что уровни звукового излучения монотонно возрастают. На частотах выше 10,0 кГц величина  $L$  становится постоянной.

Сопоставляя результаты расчётов АЧХ с экспериментальной АЧХ – 3, полученной для воздуха, можно сделать следующие выводы.

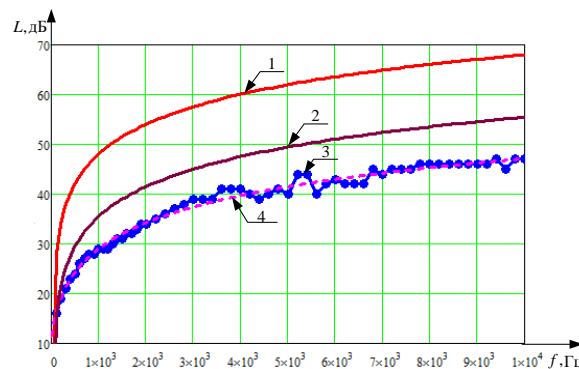


Рис. 7. Частотные зависимости уровня звукового давления: 1 – расчёт для керосина; 2 – расчёт для воды; 3 – экспериментальные данные центрального микрофона в воздухе; 4 – усреднённые значения эксперимента в воздухе

Сопоставляя результаты расчётов АЧХ с экспериментальной АЧХ – 3, полученной для воздуха, можно сделать следующие выводы. Уровни звука термофона, излучающего в дистиллированную воду примерно на 6 дБ выше уровня звука, создаваемых термофоном в воздухе. Наибольшую акустическую эффективность имеет термофон, генерирующий звуковые волны в керосин. В этом случае уровни звука на 18...20 дБ выше излучения в воздух (кривая 3).

### Заключение

В заключение отметим, что для проведения гидроакустических измерений в жидких средах, необходимо разрабатывать специальные термофоны, гидроизолированные от проводящей жидкости за счёт иммерсионной жидкости. В природе существует множество жидкостей, являющихся электроизоляторами. Например, для этой цели могут быть использованы электроизоляционные жидкости 132-12Д и ПЭС-3Д, широко используемые при производстве электроакустических преобразователей и гидроакустической аппаратуры.

## Литература

1. Беранек Л. Акустические измерения. – М.: ИЛ, 1952, – 626 с.
2. Arnold H.D., Crandall I.B. The Thermophone as a Precision Source of Sound // Phys. Rev., 1917. – С.22–38.
3. Wente E.C. The Thermophone // Phys. Rev., 1922. – С.333–345.
4. Shinoda H., Nakajima T., Ueno K., Koshida N. Thermally induced ultrasonic emission from porous silicon. Nature (London), Vol 400, 1999. – P. 853-855.
5. Chitnis G., Kim A., Song S.H., Jessop A.M., Bolton J.S. A thermophone on porous polymeric substrate. Birck and NCN Publications, 2012. – P. 1160.
6. Niskanen A. O., Hassel J., Gronberg L., Helisto P. Suspended Metal Wire Array as a Thermoacoustic Sound Source. J. Appl. Phys. Lett. 95(16), 2009. – p. 163102.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том VI. Гидродинамика // – М.: Наука, 1986. – с. 736.
8. Васильев Б.П., Невеселова К.В. Термоакустические источники звука на основе плоских проволочных структур. СПб.: МИТ, № 4 (30), том 1, 2015, с. 66-71.
9. Невеселова К.В. Расчёт амплитуды переменной температуры активного элемента термофона. СПб.: МИТ, № 4 (26), том 1, 2014, с. 110-115.
10. Васильев Б.П., Невеселова К.В., Легуша Ф.Ф. Низкочастотные источники звука на основе термоакустического эффекта. Тр. НТК, Неделя военной науки, ч. IV, СПб.: Издание ВМПИ, 2014 г. – с. 112-121.
11. Легуша Ф.Ф., Невеселова К.В. Экспериментальные исследования современных термофонов. // СПб.: МИТ, № 4(30), том 1, 2015. – с. 60-65.
12. Легуша Ф.Ф., Васильев Б.П., Невеселова К.В. Исследование процесса излучения звука современными термофонами. Вестник СПбО АИН, Вып. 13. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2015 г.
13. Васильев Б.П., Легуша Ф.Ф., Невеселова К.В. Термоакустический источник звука. Вестник СПбО АИН, Вып. 8. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2012 г. – с.145-159.
14. Легуша Ф.Ф., Невеселова К.В. Широкополосные термоакустические источники звука – термофоны. СПб.: МИТ, № 3 (25), том 1, 2014, с. 71-77.
15. Vasiliev B.P., Legusha F.F., Razrezova K.V., Chizhov G.V. Active elements of film sources of sound-thermophones. // 13th International Conference on Films and Coatings. J. Phys.: 2017. Conf. Ser. 857 012051.
16. Васильев Б.П., Легуша Ф.Ф., Разрезова К.В., Чижов Г.В. Экспериментальные исследования плёночных термофонов. // СПб.: МИТ, № 4 (34), том 1, 2016, С. 118-123.
17. Васильев Б.П., Легуша Ф.Ф., Пугачев С.И., Разрезова К.В., Старобинец И.М. Генерация звуковых волн плёночным термофоном в жидкость. // СПб.: МИТ, № 2 (40), том 1, 2018, С. 104-108.

## References

1. Beranek L. Acoustic measurements. M.: IL, 1952. P. 626.
2. Arnold H.D., Crandall I.B. The Thermophone as a Precision Source of Sound. Phys. Rev., 1917, pp.22-38.
3. Wente E.C. The Thermophone. Phys. Rev., 1922, pp. 333-345.
4. Shinoda H., Nakajima T., Ueno K., Koshida N. Thermally induced ultrasonic emission from porous silicon. Nature (London), Vol 400, 1999. – P. 853-855.
5. Chitnis G., Kim A., Song S.H., Jessop A.M., Bolton J.S. A thermophone on porous polymeric substrate. Birck and NCN Publications, 2012. – P. 1160.
6. Niskanen A. O., Hassel J., Gronberg L., Helisto P. Suspended Metal Wire Array as a Thermoacoustic Sound Source. J. Appl. Phys. Lett. 95(16), 2009. – p. 163102.
7. Landau, LD, Lifshits, EM Theoretical physics. Volume VI. Hydrodynamics // - M.: Nauka, 1986. - p. 736
8. Vasil'yev B.P., Neveselova K.V. Termoakusticheskiye istochniki zvuka na osnove ploskikh provolochnykh struktur. SPb.: MIT, № 4 (30), tom 1, 2015, s. 66-71..
9. Neveselova K.V. Raschot amplitudy peremennoy temperatury aktivnogo elementa termofona. SPb.: MIT, № 4 (26), tom 1, 2014, s. 110-115. 10.
10. Vasil'yev B.P., Neveselova K.V., Legusha F.F. Nizkochastotnyye istochniki zvuka na osnove termoakusticheskogo effekta. Tr. NTK, Nedelya voyennoy nauki, ch. IV, SPb.: Izdaniye VMPI, 2014 g. – s. 112-121. 11.
11. Legusha F.F., Neveselova K.V. Eksperimental'nyye issledovaniya sovremennykh termofonov. // SPb.: MIT, № 4(30), tom 1, 2015. – s. 60-65. 12.
12. Legusha F.F., Vasil'yev B.P., Neveselova K.V. Issledovaniye protsessa izlucheniya zvuka sovremennymi termofonami. Vestnik SPbO AIN, Vyp. 13. – SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2015 g. 13.
13. Vasil'yev B.P., Legusha F.F., Neveselova K.V. Termoakusticheskiy istochnik zvuka. Vestnik SPbO AIN, Vyp. 8. – SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2012 g. – s.145-159. 14.
14. Legusha F.F., Neveselova K.V. Shirokopolosnyye termoakusticheskiye istochniki zvuka – termofony. SPb.: MIT, № 3 (25), tom 1, 2014, s. 71-77. 15.
15. Vasiliev B.P., Legusha F.F., Razrezova K.V., Chizhov G.V. Active elements of film sources of sound-thermophones. // 13th International Conference on Films and Coatings. J. Phys.: 2017. Conf. Ser. 857 012051. 16.
16. Vasil'yev B.P., Legusha F.F., Razrezova K.V., Chizhov G.V. Eksperimental'nyye issledovaniya plonochnykh termofonov. // SPb.: MIT, № 4 (34), tom 1, 2016, S. 118-123. 17.
17. Vasil'yev B.P., Legusha F.F., Pugachev S.I., Razrezova K.V., Starobinets I.M. Generatsiya zvukovykh voln plonochnym termofonom v zhidkost'. // SPb.: MIT, № 2 (40), tom 1, 2018, S. 104-108.

УДК 534.232+534.414

## ВХОДНОЙ ИМПЕДАНС ПЕРИОДИЧЕСКОГО НАБОРА ПОРШНЕВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ С АКУСТИЧЕСКИМИ РЕЗОНАТОРАМИ В ЖЕСТКОМ ЭКРАНЕ

### **Валерий Дмитриевич Лукьянов**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий учебным центром  
Открытое акционерное общество «Авангард»  
191257, Санкт-Петербург, Кондратьевский пр., 72  
e-mail: lukyanovvd@rambler.ru

### **Людмила Васильевна Носова**

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник  
доцент кафедры математики  
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского  
197198, Санкт-Петербург, Ждановская ул., 13  
e-mail: lvn1201@gmail.com

### **Сергей Валентинович Будрин**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры гидрофизических средств поиска  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: fizika@smtu.ru

### **Вячеслав Львович Маслов**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: fizika@smtu.ru

### **Дмитрий Владимирович Никущенко**

доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: science@smtu.ru

### **Анатолий Константинович Филимонов**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры гидрофизических средств поиска  
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: fizika@smtu.ru

### **Аннотация**

Построено аналитическое решение двумерной задачи об излучении периодическим набором поршневых излучателей, размещенных в жестком экране, в полуплоскость, заполненную акустической средой. Поршни подкреплены упругими пружинами и нагружены на акустические резонаторы. Гармонические колебания поршневых излучателей поддерживаются активными силами, синхронизированными между собой. Акустическое поле в полуплоскости представляет собой набор распространяющихся однородных плоских волн и неоднородных волн, которые локализованы вблизи поршневых излучателей.

Найдено аналитическое представление для входного импеданса поршневых излучателей. Входной импеданс представлен в виде алгебраической суммы импедансов поршневых излучателей, которые колеблются в вакууме, и входных импедансов излучения поршней в акустические среды, заполняющие полуплоскость и акустические резонаторы. Каждый из импедансов излучения поршней представлен в виде парциальных импедансов излучения поршней в нормальные волны, возбуждаемые в полуплоскости и резонаторах.

Проведены численные расчеты зависимости коэффициента возбуждения основной нормальной волны, возбуждаемой в полуплоскости, от частоты сил, действующих на поршневые излучатели. Анализ показал, что вид частотной зависимости коэффициента возбуждения связан с особенностями поведения частотных зависимостей реальной и мнимой частей входного импеданса периодической системы поршневых излучателей. Максимумы коэффициента возбуждения имеют резонансный характер, так как достигаются на частотах, при которых мнимая часть входного импеданса обращается в нуль. Минимумы коэффициента возбуждения достигаются на частотах зарождения распространяющихся нормальных волн в полуплоскости и резонаторах.

**Ключевые слова:** гармонические акустические колебания, входной импеданс, периодический набор, резонатор, поршневой излучатель.



## ENTRANCE IMPEDANCE OF PERIODIC SET OF PISTON RADIATORS WITH ACOUSTIC RESONATORS IN THE RIGID SCREEN

### Valeriy D. Lukyanov

the professor, Dr. of physical and mathematical sciences,  
head education centre  
joint-stock company «Avangard»  
Kondrat'evsky, 72, St. Petersburg 195271, Russian Federation  
e-mail: lukyanovvd@rambler.ru

### Lyudmila V. Nosova

the candidate of physical and mathematical sciences, associate professor mathematics  
Mozhaisky Military Space Academy  
Zhdanovskaya, 13, St. Petersburg 197198, Russian Federation  
e-mail: lvn1201@gmail.com

### Sergey V. Budrin

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Hydrophysical Search Facilities  
St. Petersburg State Maritime Technical University  
190121, St. Petersburg, ul. Pilot, 3  
e-mail: fizika@smtu.ru

### Vyacheslav L. Maslov

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Physics  
St. Petersburg State Maritime Technical University  
190121, St. Petersburg, ul. Pilot, 3  
e-mail: fizika@smtu.ru

### Dmitry V. Nikushchenko

the professor Dr. Sci. Tech., Pro-rector for Research  
State marine technical university of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya Str., 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: science@smtu.ru

### Anatoly K. Filimonov

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Hydrophysical Search Facilities  
St. Petersburg State Maritime Technical University  
190121, St. Petersburg, ul. Pilot, 3  
e-mail: fizika@smtu.ru

### Abstract

The analytical solution of a two-dimensional task about radiation by a periodic set of the piston radiators placed in the rigid screen in the half-plane filled with the acoustic medium is constructed. Pistons are supported by elastic springs and loaded on acoustic resonators. Harmonic oscillations of piston radiators are sustained by the active forces synchronized among themselves. The acoustic field in the half-plane represents a set of the extending uniform flat waves and non-uniform waves which are localized near piston radiators.

Analytical representation for an entrance impedance of piston radiators is found. The entrance impedance is presented in the form of the algebraic sum of impedances of piston radiators which fluctuate in the vacuum and entrance impedances of radiation of pistons into the acoustic medium filling the half-plane and acoustic resonators. Each of impedances of radiation of pistons is presented in the form of partial impedances of radiation of pistons in the normal waves excited in the half-plane and resonators.

Numerical calculations of dependence of excitement coefficient for the main normal wave excited in the half-plane from the frequency of forces operating on piston radiators are carried out. The analysis showed that the type of frequency dependence of excitement coefficient is connected with features of behavior of frequency dependences of real and imaginary parts of an entrance impedance of a periodic system of piston radiators. Maxima of excitement coefficient have resonant character as they are reached at frequencies with which an imaginary part of an entrance impedance addresses into zero. Minima of excitement coefficient are reached at frequencies of origin of the extending normal waves in the half-plane and resonators.

**Key words:** harmonic acoustic oscillations, entrance impedance, periodic set, resonator, piston radiator.

### Введение

Задача об излучении поршня, размещенного в жестком экране, впервые решена Рэлеем [1].

Результаты физического исследования акустического поля в случае круглого диска приведены в [2], для ленты в [3].



Наборы поршневых излучателей в жестком экране (плоские и пространственные задачи) использовались в работах [4-9] при теоретическом моделировании гидроакустических антенн. Было показано, что взаимодействие элементарных излучателей, из которых состоит антенна, существенно влияет на её характеристики.

Важнейшей характеристикой излучателя является его входной импеданс. На простейшей модели антенны, в которой в качестве элементарных излучателей выберем резонансный поршень, исследуем её входной импеданс. Рассмотрим простейший способ управления входным импедансом с помощью нагружения каждого элементарного излучателя акустическим резонатором.

**1. Постановка задачи об излучении периодического набора поршневых излучателей, нагруженных акустическим резонатором**

Выбор системы координат и геометрия задачи показаны на рис. 1. Рассматривается плоская задача об излучении периодической системы поршневых излучателей, размещенных с периодом  $2H$  в жестком экране. Экран расположен вдоль прямой  $y = 0, -\infty < x < +\infty$ .

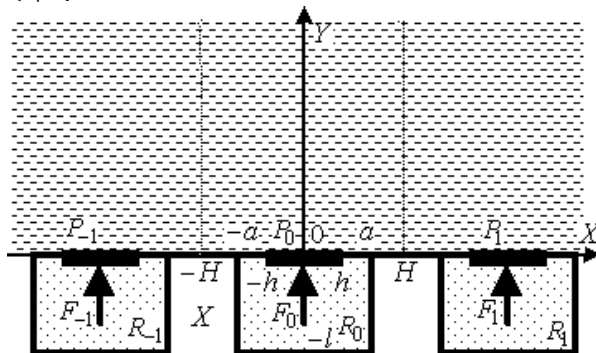


Рис. 1. Система координат и геометрия задачи: поршни  $P_s$ , колеблющиеся под действием сил  $F_s$ , нагруженные на акустические резонаторы  $R_s$ , и излучающие в полуплоскость  $y > 0$ .

Излучение акустических волн производится в полупространство  $y > 0$ , заполненное акустической средой с плотностью  $\rho_1$  и скоростью звука  $c_1$ .

Поршни массой  $M$  шириной  $2h$  ( $h \leq H$ ) размещены в экране на участках  $-h + 2sH \leq x \leq h + 2sH$ , где  $s$  – номер излучателя,  $s = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Поршни подкреплены пружинами, жесткость которых  $N$ . Поршни нагружены на прямоугольные акустические резонаторы, заполненные акустической средой с плотностью  $\rho_2$  и скоростью звука  $c_2$ , с жесткими стенками шириной  $2a$  и глубиной  $l$ .

Стационарные колебания акустических давлений:  $P_1 = P(x, y)$  – в полуплоскости  $y > 0$  и  $P_2 = Q(x, y)$  – в резонаторах удовлетворяют однородным уравнениям Гельмгольца

$$\frac{\partial^2 P_\varepsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_\varepsilon}{\partial y^2} + k_\varepsilon^2 P_\varepsilon = 0,$$

где  $\varepsilon = 1$  для среды в полуплоскости,  $\varepsilon = 2$  для среды в резонаторах;  $k_\varepsilon$  – волновые числа в

акустических средах,  $k_\varepsilon = \omega/c_\varepsilon$ . Множитель  $\exp(-i\omega t)$ , задающий зависимость всех колебательных и волновых процессов от времени  $t$ , будет везде опускаться.

Волны в полуплоскости возбуждаются поршневыми излучателями под действием фазированных между собой сил. На  $s$ -й поршень действует активное давление с комплексной амплитудой  $A_s$ :  $A_s = A_0 e^{i s F}$ , где  $F = 2k_1 H \sin \theta$  – разность фаз у комплексных амплитуд давлений для соседних излучателей.

Уравнение движения  $s$ -го поршня с учетом контакта с акустическими средами имеет вид

$$(N - M\omega^2)U_s = \int_{2sH-h}^{2sH+h} (Q(x, 0) - P(x, 0)) dx - 2hA_s, \tag{1}$$

где  $U_s$  – комплексная величина амплитуды смещения  $s$ -го поршня от начального положения равновесия,  $s = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Условие равенства смещения  $s$ -го поршня и нормальной компоненты смещения акустической среды вблизи него в полуплоскости имеет вид

$$U_s = \frac{1}{\rho_1 \omega^2} \frac{\partial P(x, 0)}{\partial y}, \tag{2}$$

при  $2sH - h \leq x \leq 2sH + h$ , где  $s = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

На жестком экране вне излучателя выполнено условие отсутствия смещения среды

$$\frac{1}{\rho_1 \omega^2} \frac{\partial P(x, 0)}{\partial y} = 0, \tag{3}$$

Условия (2) и (3) перепишем в виде одного условия

$$\chi_s^{(1)}(x)U_s = \frac{1}{\rho_1 \omega^2} \frac{\partial P(x, 0)}{\partial y}, \tag{4}$$

где  $(2s - 1)H \leq x \leq (2s + 1)H$ ,  $\chi_s^{(1)}(x)$  – характеристическая функция отрезка  $2sH - h \leq x \leq 2sH + h$ , на котором она равна единице, а вне этого промежутка её значение равно нулю.

Условие равенства смещения  $s$ -го поршня и нормальной компоненты смещения акустической среды вблизи него в резонаторе запишется в виде

$$\chi_s^{(2)}(x)U_s = \frac{1}{\rho_2 \omega^2} \frac{\partial Q(x, 0)}{\partial \bar{n}}, \tag{5}$$

где  $2sH - a \leq x \leq 2sH + a$ ,  $\chi_s^{(2)}(x)$  – характеристическая функция отрезка  $2sH - h \leq x \leq 2sH + h$ .

Стенки резонатора – абсолютно жесткие. Отсутствие смещения стенки резонатора в точке  $G$  задаётся граничным условием

$$\frac{1}{\rho_2 \omega^2} \frac{\partial Q(G)}{\partial \bar{n}} = 0,$$

где  $\bar{n}$  – направление внешней нормали к стенкам резонатора.

**2. Входной импеданс периодического набора поршневых излучателей, нагруженных акустическим резонатором**

С учетом линейности задачи, периодичности её геометрии, а также условия фазирования активных сил, воздействующих на поршни, акустическое поле в полуплоскости удовлетворяет условию квазипериодичности

$$P(x + 2H, y) = e^{iF} P(x, y), \tag{6}$$

где  $F = 2k_1 H \sin \theta$ ,  $|\theta| < \pi/2$ .

В соответствии с теоремой Флоке сведём поставленную задачу, в которой ищется распределение акустического давления в полуплоскости  $y > 0$ , к задаче об излучении одного

поршня, например, с нулевым номером, в полосе  $-H < x < H, y > 0$ , с краевыми условиями на боковых сторонах полосы

$$P(H, y) = e^{iF} P(-H, y), \quad (7)$$

$$\frac{\partial P(H, y)}{\partial x} = e^{iF} \frac{\partial P(-H, y)}{\partial x}. \quad (8)$$

Если найдено распределение давления в полосе, то акустическое давление в полуплоскости находится по соотношению (6).

В полосе возбуждаются нормальные волны (моды)

$$W_n(x, y) = \sqrt{\frac{k_1}{\lambda_n}} \varphi_n(x) e^{i\lambda_n y},$$

где

$$\varphi_n(x) = \exp(ip_n x), \quad p_n = (2\pi n + F)/2H, \\ \lambda_n = \sqrt{k_1^2 - p_n^2}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Если величина  $\lambda_n$  вещественна, то мода  $W_n(x, y)$  является распространяющейся волной, переносящей колебательную энергию от излучателей. При  $|p_n| > k_1$  величина  $\lambda_n$  является чисто мнимой, нормальная волна будет неоднородной, распределение давления в этой волне экспоненциально убывает при удалении от линии размещения излучателей.

Акустическое давление в полосе будем искать в виде разложения по нормальным волнам  $W_n(x, y)$

$$P(x, y) = A_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \alpha_n W_n(x, y) \quad (8)$$

где  $\alpha_n$  – безразмерные искомые величины, умноженные на величину  $A_0$ , дают амплитуды нормальных волн давления, возбуждаемых в полосе поршневым излучателем.

В прямоугольном резонаторе с жесткими стенками поршни возбуждают стоячие волны вида

$$V_n(x, y) = A_0 \psi_n(x) \cos(\mu_n(x + l)),$$

где  $V_n(x, y)$  – распределение давление  $n$ -й стоячей волны в резонаторе,  $\psi_n(x) = \cos(q_n x)$ ,  $q_n = \pi n/a$ ,

$$\mu_n = \sqrt{k_2^2 - q_n^2}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Разложение акустического давления в резонаторе по стоячим волнам имеет вид

$$Q(x, y) = A_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \beta_n V_n(x, y). \quad (9)$$

где  $\beta_n$  – безразмерные искомые величины, умноженные на величину  $A_0$ , дают амплитуды стоячих волн давления, возбуждаемых в резонаторе поршневым излучателем.

Введем входной импеданс  $Z_0$  поршневого излучателя с номером нуль, нагруженного на акустический резонатор и полосу, как отношение давления  $A_0$  на излучатель к его колебательной скорости  $v_0 = -i\omega U_0$  под действием этого давления

$$Z_0 = \frac{A_0}{-i\omega U_0}. \quad (10)$$

Для вычисления входного импеданса, используя представления для акустических давлений (8), (9) и смещения поршня  $U_0 = A_0/(-i\omega Z_0)$ , обеспечим выполнение граничных условий (1), (4) и (5).

Граничное условие (4) приводит к уравнению

$$\frac{\chi_0^{(1)}(x)}{Z_0} = \frac{1}{\rho_1 c_1} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sqrt{\frac{\lambda_n}{k_1}} \alpha_n \varphi_n(x), \quad (11)$$

при  $-H \leq x \leq H$ .

Умножая равенство (11) на функцию  $\overline{\varphi_m(x)}$ , где черта над функцией означает комплексное сопряжение, и интегрируя равенство по переменной  $x$  в пределах от  $-H$  до  $H$ , имеем с учётом ортогональности функций  $\varphi_n(x)$  и  $\overline{\varphi_m(x)}$  если  $n \neq m$

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{\lambda_n}{k_1}} \frac{\rho_1 c_1 \delta_n}{Z_0}, \quad (12)$$

где  $\delta_n$  – коэффициент разложения характеристической функции  $\chi_0^{(1)}(x)$  в ряд Фурье по ортогональному базису  $\{\varphi_n(x)\}_{n=-\infty}^{+\infty}$

$$\chi_0^{(1)}(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta_n \varphi_n(x), \\ \delta_n = \frac{1}{2H} \int_{-H}^H \chi_0^{(1)}(x) \overline{\varphi_n(x)} dx = \\ = \frac{1}{2H} \int_{-h}^h \frac{1}{\varphi_n(x)} dx = \frac{\sin(p_n h)}{p_n H}$$

при  $p_n \neq 0$ , и  $\delta_n = h/H$  при  $p_n = 0$ .

Граничное условие (5) приводит к равенству

$$\frac{\chi_0^{(2)}(x)}{Z_0} = \frac{1}{\rho_2 c_2} \sum_{n=0}^{+\infty} \beta_n \psi_n(x). \quad (13)$$

при  $-h \leq x \leq h$ .

Умножая равенство (13) на функцию  $\psi_m(x)$  для  $m = 0, 1, 2, \dots$ , и интегрируя полученное равенство в пределах от  $-h$  до  $h$ , имеем

$$\beta_m = \frac{ik_2 \rho_2 c_2 \eta_m}{\mu_m \sin(\mu_m l) Z_0}, \quad (14)$$

где  $\eta_m$  – коэффициенты Фурье характеристической функции  $\chi_0^{(2)}(x)$  при разложении её по ортогональному базису  $\{\psi_n(x)\}_{n=0}^{+\infty}$ :  $\eta_0 = h/a$ ,  $\eta_n = 2 \sin(\pi n h/a)/\pi n$  при  $n > 0$ .

Уравнение движения (1) для поршня с нулевым номером с использованием представлений (8) и (9) после сокращения на величину  $A_0$ , принимает вид

$$\frac{N - M\omega^2}{-i\omega Z_0} = \quad (15)$$

$$= \int_{-h}^h \left( \sum_{n=0}^{+\infty} \beta_n V_n(x, 0) - \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \alpha_n W_n(x, 0) \right) dx + 2h.$$

С учетом формул (12) и (14) для коэффициентов  $\alpha_n$  и  $\beta_n$  найдено значение входного импеданса

$$Z_0 = Z_* + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} Z_n^{(1)} + \sum_{n=0}^{+\infty} Z_n^{(2)}. \quad (16)$$

где  $Z_* = -i\omega \rho (1 - \omega_0^2/\omega^2)$ ,  $\omega_0$  – собственная частота поршня в вакууме (без контакта с акустическими средами),  $\omega_0 = \sqrt{N/M}$ ,  $\rho$  – поверхностная плотность поршня,  $\rho = M/(2h)$ ;

$$Z_n^{(1)} = \frac{k_1 \rho_1 c_1 H}{\lambda_n h} \delta_n^2,$$

$$Z_n^{(2)} = \frac{ik_2 \rho_2 c_2 a}{\mu_n h} \text{ctg}(\mu_n l) \eta_n^2.$$

где  $Z_n^{(1)}$  и  $Z_n^{(2)}$  – импедансы взаимодействия колеблющегося поршня и  $n$ -й моды колебаний соответственно в полосе и резонаторе.

Акустическое давление, возбуждаемое в полосе системой поршневых излучателей, размещенных в жестком экране, согласно представлению (12), с использованием выражения (16), имеет вид

$$P(x, y) = \frac{A_0}{Z_0} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sqrt{Z_0^{(1)} Z_n^{(1)}} W_n(x, y). \quad (17)$$

Отметим также, что, если положить в формулах (16) и (17)  $\rho_2 = 0$ , то формула (17) даёт решение задачи об излучении в полуплоскость системы

поршневых излучателей при отсутствии резонаторов, если считать, что входной импеданс вычисляется по формуле

$$Z_0 = Z_* + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} Z_n^{(1)}. \quad (18)$$

Если в формулах (16) и (17) считать, что  $\rho_1 = 0$ , то имеем решение задачи о возбуждении акустического поля в резонаторах. В частности, равенство  $Z_0 = 0$ , которое в данном случае принимает вид

$$Z_* + \sum_{n=0}^{+\infty} Z_n^{(2)} = 0$$

есть уравнение для нахождения собственных частот резонатора, в одной стенке которого размещен поршневой излучатель.

Приведем также выражения для смещения излучателей и акустического давления в верхней полуплоскости в частном случае, когда каждый излучатель полностью перекрывает полосу ( $h = H$ ), ширина резонатора также равна этому периоду ( $d = H$ ) и все излучатели возбуждаются синфазно ( $F = 0$ ) Здесь коэффициенты Фурье характеристических функций отрезка таковы:  $\delta_0 = \eta_0 = 1$ ,  $\delta_n = \eta_n = 0$  при  $n > 0$ . Здесь импедансы вычисляются по формулам

$$Z_0^{(1)} = \rho_1 c_1, \quad Z_0^{(2)} = \rho_2 c_2, \quad Z_n^{(1)} = Z_n^{(2)} = 0$$

при  $n > 0$ .

Поршневые излучатели колеблются синфазно с амплитудой смещения

$$U = \frac{A_0}{-i\omega Z_0},$$

где  $Z_0$  – их входной импеданс  $Z_0 = Z_* + Z_0^{(1)} + Z_0^{(2)}$ .

В верхней полуплоскости возбуждается единственная плоская волна, фронт которой параллелен линии размещения излучателей. Обозначив акустическое давление для этого частного случая через  $P_0(x, y)$ , получим из формулы

$$P_0(x, y) = \frac{A_0 Z_0^{(1)}}{Z_0} e^{ik_1 x}.$$

### 3. О частотной зависимости входного импеданса периодического набора поршневых излучателей

Результаты численных расчетов зависимости коэффициента возбуждения нормальной волны нулевого порядка

$$\alpha_0 = \frac{Z_0^{(1)}}{Z_0} \quad (19)$$

от безразмерной частоты  $\Omega = k_1 H$  при значении параметра  $F = 0$  (синфазное возбуждение поршневых излучателей) показаны на рис. 2 и 3. Нормальная волна нулевого порядка распространяется в этом случае в положительном направлении оси  $OY$ .

Вычисления проводились при следующих значениях безразмерных величин:

$$m/\rho_1 H = 0.5, \quad \Omega_0 = \omega_0 H/c_1 = 2.0.$$

Полуплоскость и резонаторы заполнены одинаковыми акустическими средами ( $k_1 = k_2$ ). Геометрические размеры конструктивных элементов выбраны так, что

$$h/H = 0.5, \quad a/H = 1, \quad l/H = 1.2.$$

Для анализа полученной кривой рассмотрим зависимость входного импеданса  $Z_0$ , определенного формулой (16) и стоящего в знаменателе выражения для  $\alpha_0$  в формуле (19), от частоты  $\Omega$ .

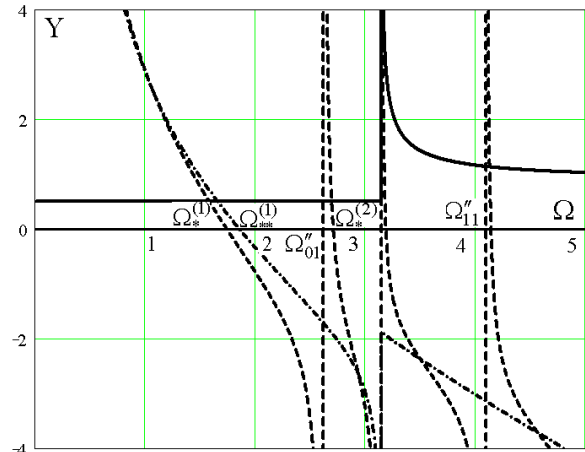


Рис. 2 Зависимости активных и реактивных частей входного импеданса от безразмерной частоты  $\Omega$  для двух вариантов: 1 – когда излучатели нагружены на резонатор, 2 – когда резонаторы отсутствуют. Зависимости активных частей (сплошные линии) – для двух вариантов совпадают, реактивные части для первого варианта – штриховая линия; для второго варианта – штрих-пунктирная линия

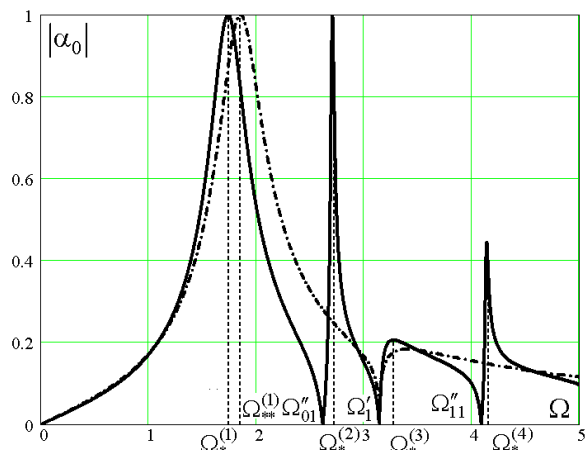


Рис. 3 Зависимости коэффициента возбуждения нормальной волны нулевого порядка при синфазном возбуждении излучателей от безразмерной частоты  $\Omega$ : сплошная линия – излучатели нагружены на резонаторы; штрих-пунктирная линия – резонаторы не заполнены средой ( $\rho_2 = 0$ )

Входной импеданс  $Z_0$  представляет собой комплексную величину, реальная часть которой (активная составляющая импеданса) есть сумма всех импедансов  $Z_n^{(1)}$  для распространяющихся волн  $W_n(x, y)$  в полупространстве. Мнимая часть входного импеданса  $Z_0$  (реактивная составляющая) складывается из импеданса излучателя, импедансов взаимодействия излучателя со всеми формами колебания резонатора и с неоднородными волнами в полосе.

Отметим, что на некоторых частотах, так называемых антирезонансах полосы и резонатора, реактивная часть входного импеданса обращается в бесконечность. Антирезонансы полосы совпадают с частотами зарождения нормальных волн в полосе. Частоту зарождения  $n$ -й нормальной волны обозначим через  $\omega'_n$ . На этой частоте выполнено

равенство  $\lambda_n = 0$ . Антирезонансы резонаторов находятся из уравнения  $\sin(\mu_n l) = 0$ , откуда следует, что  $\mu_n l = \pi m$  при некоторых  $n$  и  $m$ . На антирезонансах значение  $|\alpha_0| = 0$ . Соответствующие безразмерные частоты  $\Omega'_n = \omega'_n H / c_1$  и  $\Omega''_n = \omega''_n H / c_1 = \pi \sqrt{(nH/a)^2 + (mH/l)^2}$  показаны на рис. 2 и 3.

Положение максимумов  $|\alpha_0|$  на частотной зависимости объясняется резонансным характером излучения периодической системы поршневых излучателей.

На частотах ниже частоты зарождения нормальной волны с номером один ( $\Omega < \Omega'_1$ ) значения этих максимумов равны единице. В этом диапазоне частот в верхней полуплоскости распространяется без затухания только нормальная волна нулевого порядка, и только импеданс этой волны  $Z_0^{(1)} = \rho_1 c_1 h / H$  является вещественной величиной, причем не зависящей от частоты  $\Omega$ . Минимальное значение  $|Z_0| = Z_0^{(1)}$ , которому соответствует максимальное значение  $|\alpha_0| = 1$ , достигается поэтому на резонансных частотах  $\Omega_*^{(m)}$ , на которых реактивная составляющая входного импеданса обращается в нуль,  $m$  – порядковый номер максимума. Положения максимумов находятся из уравнения  $\text{Im} Z_0 = 0$  и входной импеданс  $Z_0$  есть вещественная величина. Таким образом только взаимодействие колебательных процессов набора поршневых излучателей через ближнее акустическое поле, в которое существенный вклад дают неоднородные волны, обеспечивают резонансное излучение в акустическую среду с максимумами частотной зависимости коэффициента возбуждения нормальных волн.

На частотах  $\Omega > \Omega'_1$  в верхней полуплоскости возбуждается уже несколько распространяющихся нормальных волн, активная составляющая входного импеданса  $Z_0$  зависит от частоты. Положение максимума величины  $|\alpha_0|$  и его значение, которое меньше единицы, зависит от перераспределения

энергии между всеми распространяющимися волнами.

Существенное изменение частотной зависимости коэффициента возбуждения нормальной волны нулевого порядка в случае контакта поршневых излучателей с резонаторами объясняется наличием в этом случае дополнительных антирезонансов резонаторов.

### Заключение

На основании точного аналитического решения двумерной задачи об излучении гармонических во времени волн в акустическую среду, заполняющую полуплоскость, периодическим набором резонансных поршневых излучателей, размещенных в жестком экране, и нагруженных на прямоугольные акустические резонаторы (кратко, акустической системой):

- получено аналитическое представление для входного импеданса акустической системы, который равен сумме входного импеданса резонансных поршней, колеблющихся в вакууме, и входных импедансов полупространства и резонаторов, на которые нагружены поршневые излучатели;

- установлено, что амплитуды нормальных волн, возбуждаемых в акустической системе, обратно пропорциональны входному импедансу;

- частотная зависимость амплитуд нормальных волн, возбуждаемых в акустической системе, имеет резонансный характер; для низких частот, на которых частотная зависимость имеет максимальное значение, реактивная часть входного импеданса обращается в нуль; на средних частотах резонансные частоты находятся вблизи частот, на которых реактивная часть входного импеданса обращается в нуль;

- изменение геометрических и акустические характеристики параметров резонаторов, на которые нагружены поршни, существенно меняют характер частотной зависимости амплитуд нормальных волн, что позволяет, подбирая волновые свойства резонаторов, регулировать излучение в полупространство

### Литература

1. Дж. В. Стретт (Лорд Релей) Теория звука. – М.: ГИТТЛ., 1944, т. 2. – 476 с.
2. Ржевкин С.Я. Курс лекций по теории звука. – М.: МГУ, 1960. – 335 с.
3. Шендеров Е.Л. Излучение и рассеяние звука. – Л.: Судостроении, 1989. – 302 с.
4. Смаришев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. – Л.: Судостроение, 1972. – 278 с.
5. Свердлин Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны. – Л.: Судостроение, 1988.
6. Вовк И.В., Гайдай В.А., Маяцкий В.И. К вопросу о влиянии акустического взаимодействия электроакустических преобразователей на направленные свойства приемных многолучевых антенн. Акустический журнал, 1969, Т. 15, № 1. – С. 124-126.
7. Добровольский Ю.Ю. К определению параметров протяженных акустических антенн, состоящих из резонансных поршневых излучателей. Акустический журнал, 1975, Т. 21, № 4. – С. 538-543.
8. Добровольский Ю.Ю. Об излучении бесконечной периодической решетки колеблющихся полос в плоском акустически податливом экране. Акустический журнал, 1976, Т. 22, № 6. – С. 933-935.
9. Добровольский Ю.Ю., Кудашева О.А., Рубанов И.А. О влиянии взаимодействия резонансных электроакустических преобразователей на параметры излучающей линейной антенной решетки. Акустический журнал, 1983, Т. 29, № 3. – С. 341-346.

### References

1. Dzh. V. Strett (Lord Reley) Teoriya zvuka. M.: GITTL., 1944, t. 2. P. 476.
2. Rzhevkin S.Ya. Kurs lektsiy po teorii zvuka. M.: MGU, 1960. P. 335.
3. Shenderov E.L. Izluchenie i rasseyanie zvuka. L.: Sudostroenii, 1989. P.302.
4. Smaryshev M.D. Napravlennost' gidroakusti-cheskikh antenn. L.: Sudostroenie, 1972. P.278.
5. Sverdlin G.M. Gidroakusticheskie preobra-zovateli i anteny. L.: Sudostroenie, 1988.

- 
6. *Vovk I.V., Gayday V.A., Mayatskiy V.I.* K voprosu o vliyaniy akusticheskogo vzaimodeystviya elektroakusticheskikh preobrazovateley na napravlennye svoystva priemnykh mnogoluchevykh antenn. *Akusticheskiy zhurnal*, 1969, T. 15, № 1. pp. 124-126.
  7. *Dobrovol'skiy Yu.Yu.* K opredeleniyu parametrov protyazhennykh akusticheskikh antenn, sostoyashchikh iz rezonansnykh porshnevnykh izluchateley. *Akusticheskiy zhurnal*, 1975, T. 21, № 4. pp. 538-543.
  8. *Dobrovol'skiy Yu.Yu.* Ob izlucheni beskonechnoy periodicheskoy reshetki koleblyushchikhsya polos v ploskom akusticheski podatlivom ekrane. *Akusticheskiy zhurnal*, 1976, T. 22, № 6. pp. 933-935.
  9. *Dobrovol'skiy Yu.Yu., Kudasheva O.A., Rubanov I.A.* O vliyaniy vzaimodeystviya rezonansnykh elektroakusticheskikh preobrazovateley na parametry izluchayushchey lineynoy antennoy reshetki. *Akusticheskiy zhurnal*, 1983, T. 29, № 3. pp. 341-346.

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ (ПО ОТРАСЛЯМ)**

УДК 623. 618

**КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ И КОНТРОЛЯ В ЗАДАЧАХ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОРСКОГО ФЛОТА РОССИИ. ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ****Маргарита Михайловна Воронина**

доктор технических наук, профессор Межвузовского центра по образованию в области истории и философии науки и техники, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10

e-mail: margo@TV2662.spb.edu

**Владимир Иванович Евсеев**

доктор технических наук, старший научный сотрудник

Северо-Западное отделение Федерации космонавтики Российской Федерации

197022, Санкт-Петербург, Каменноостровский пр., д.27, оф.14

e-mail: v.evseev43@mail.ru

**Аннотация**

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований и примеры реализации Концепции в интересах решения задач по информационному обеспечению гражданского флота России. Рассмотрены некоторые технические средства (аппаратурные комплексы) дистанционного наблюдения в задачах перспективного развития и оперативной работы существующих морских систем управления и средств их обеспечения. Используемые технические средства относятся к пассивным и активным радиолокационным комплексам, позволяющим осуществлять круглосуточное, всепогодное и всесезонное дистанционное наблюдение объектов. Описаны некоторые исторические примеры использования существовавших в стране средств дистанционного наблюдения для судоходства, спасения судов, терпящих бедствие, наблюдения ледовых полей и их динамики движения, определения структуры морского волнения. Используемые примеры позволяют утверждать, что в России накоплен большой научный и практический потенциал для создания и эффективного использования технических средств для информационного обеспечения Морского Флота, навигации на Северном морском пути, а также в освоении арктической шельфовой зоны по Федеральной и Международной программам.

**Ключевые слова:** фоны, цели, фоно-целевая обстановка, фоно-целевое информационное обеспечение, морское судоходство, навигация, спасение, ледовая разведка, авиационные носители, космические носители, спектральный диапазон электромагнитных волн, датчик, пассивная радиолокация, активная радиолокация, радиометрическая станция, радиолокационная станция.

**THE CONCEPT OF THE REMOTE MONITORING AND CONTROL SYSTEM IN THE SCOPE OF THE RUSSIAN SEA NAVY INFORMATION SUPPORT PROBLEMS. RESEARCH AND PRACTICAL IMPLEMENTATION****Margarita M. Voronina**

Dr.Sci.Tech, Professor of the Interuniversity Center for Education in history and philosophy of science and technology, St. Petersburg State Marine Technical University

190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 10

e-mail: margo@TV2662.spb.edu

**Vladimir I. Evseev**

Dr.Sci.Tech, Senior Researcher

North-West Branch of the Federation of Cosmonautics of the Russian Federation

197022, St. Petersburg, Kamennooostrovsky pr., 27, of.14

e-mail: v.evseev43@mail.ru

**Abstract**

The article presents the results of theoretical and experimental research and examples of the Concept implementation in the interests of solving problems of the civil fleet of Russia information support. Some technical means (hardware complexes) of remote monitoring in the scope of prospective

development and operational work of the existing marine control systems and means for their support are reviewed. The technical means used refer to passive and active radar complexes, which allow for round-the-clock, all-weather and all-season remote monitoring of facilities. Some historical examples of the use of remote monitoring equipment existing in the country for navigation, salvation of ships in distress, monitoring of ice fields and their motion dynamics, determination of the sea disturbance pattern are described. The examples used make it possible to assert that Russia has accumulated a large scientific and practical potential for creation and effective application of technical means for the information support of the Navy, navigation on the Northern Sea Route, and also in the development of the Arctic shelf zone under the Federal and International programs.

**Keywords:** clutter, targets, target environment, clutter-target information support, maritime navigation, navigation, rescue, ice reconnaissance, aircraft carriers, space carriers, spectral range of electromagnetic waves, sensor, passive radar, active radar, radiometric station, radar station.

Использование дистанционных методов исследования Земли с борта авиационных и космических летательных аппаратов имеет давнюю историю. Объектами исследования служили различные подстилающие поверхности (земная, морская и их сочетания), сосредоточенные природные и техногенные объекты различного назначения, месторождения природных ресурсов.

Вся совокупность объектов зондирования (наблюдения) получила название «фоно-целевая обстановка». Концепция построения системы исследований и практического использования их результатов в интересах информационного обеспечения Морского Флота России изложена в первой статье этих же авторов.

Основой построения системы дистанционного наблюдения служат приборы и аппаратные комплексы, в состав которых входят датчики, работающие в широком спектре длин электромагнитных волн: в видимом, ближнем, среднем, дальнем инфракрасном, сверхвысоко-частотном (СВЧ - мм, см, дм, м) диапазонах длин волн. В настоящее время для практических целей применяются аппаратные комплексы, использующие датчики всех диапазонов волн. По принципу действия датчики разделяются на пассивные и активные. Пассивные датчики используют собственное электромагнитное излучение, присущее всем физическим телам и их совокупностям, во всех перечисленных диапазонах волн. Активные датчики используют принимаемое обратное отражение электромагнитных волн, излучаемых передающим каналом датчика.

Как показали многолетние теоретические и экспериментальные исследования, наиболее эффективными средствами дистанционного наблюдения земной и водной поверхностей стали пассивные [3] и активные [4; 5] аппаратные комплексы с датчиками СВЧ диапазонов волн, обладающие всепогодностью и всевременностью работы в дневное и ночное время (пассивная и активная радиолокация). Большой потенциал использования радиолокационных датчиков для дистанционного зондирования Земли, атмосферы заложен в реализации поляризационных характеристик излученного и отраженного сигнала [6]. Кроме того, в настоящее время разработаны и применяются методы и средства многоспектрального и гиперспектрального построения аппаратных комплексов, которые обеспечивают самую высокую эффективность решения задач дистанционного наблюдения фоно-целевой обстановки, в том числе в интересах

Морского Флота. Приведём некоторые исторические примеры использования методов и средств пассивной и активной радиолокации для наблюдения фоно-целевой обстановки в морях и океанах.

В историческом плане одним из первых направлений научных исследований по изучению ледовых образований стала пассивная радиолокация (радиотеплокация) в мм и см диапазонах волн и соответственно первым сложным измерительным инструментом стала радиометрическая станция (РМС) трёхсантиметрового диапазона волн. Одним из пионеров исследований стал профессор Тучков Л.Т., многие годы возглавлявший научный коллектив исследователей в Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского (современное название), начиная со второй половины 1950-х годов [1; 2]. Будучи адъюнктом на кафедре радионавигации, Тучков Л.Т. самостоятельно разработал, спроектировал и собрал в 1960 году первый и единственный в истории академии радиотеплокатор, которому в дальнейшем в течение 15 лет было суждено оставаться основным инструментом для измерения излучательных характеристик (ИХ) различных объектов и фонов на земной и морской поверхности, а также ледовых образований. Исследования проводились в СВЧ-диапазоне волн в интересах решения задач не только военного характера, но и в ряде областей гражданского назначения.

РМС по своей сути представляла собой измерительный комплекс, который был оснащён телевизионной установкой, аэрофотоаппаратом, многими датчиками и индикаторами для измерения температуры, углов азимута и места, устройством «привязки» фотоснимков к осциллограммам маршрутных записей антенных радиационных температур. Она обладала возможностью приёма вертикальной и горизонтальной составляющих поляризованного излучения объектов исследования. Отметим, что РМС, изготовленная полукустарным способом в мастерских, по основным техническим параметрам не уступала аналогичным радиометрам того времени, которые были разработаны и изготовлены на промышленной базе солидных научных учреждений (Московский НИИ приборостроения, Институт радиоэлектроники и Институт космических исследований АН СССР и другие). Первоначально РМС использовалась в стационарных условиях на открытой площадке (Рис. 1, а). Здесь проводился полный комплекс работ на этой станции: настройка, калибровка и измерения излучательных характеристик ледового покрова в



процессе его нарастания на водной поверхности бассейна в реальных погодных условиях.

В 1964 – 1965 гг. станция, использовалась для измерений ИХ морского льда в районе Карского моря



Рис. 1, а



Рис. 1, б

Конструкция РМС была разработана таким образом, что позволяла разместить её на борту вертолёта Ми-4 (Рис.2), превращая станцию в мобильный вариант трассового радиометра,

антенный луч которого оператор мог перемещать, как по углу места, так и в азимутальной плоскости. Именно такой вариант нашёл наибольшее применение в экспериментальных исследованиях.



Рис. 2. Вертолёт Ми-4, оборудованный СВЧ-радиометрической станцией

Летом 1964 года в Енисейском заливе Тучковым Л.Т. с коллегами были выполнены уникальные измерения антенных температур морской поверхности и ледового покрова во время

пролёта по Северному морскому пути над трассой следования атомного ледокола «Ленин» и ледокола «Красин» (Рис. 3).

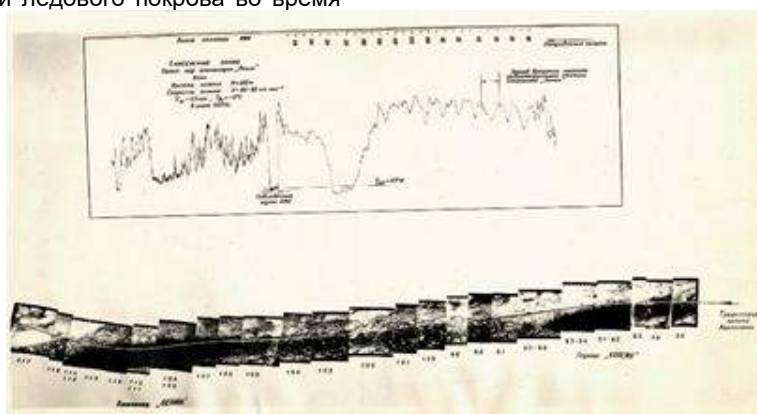


Рис. 3. Данные радиометрических измерений

Проведённые измерения помогли определить вдоль трассы толщину, состояние и параметры передвижения льдов и выдать рекомендации судам по выбору наиболее безопасного курса движения ледоколов.

В последующие годы потенциал РМС был значительно повышен за счёт введения в радиометр 8-мм канала для приёма радиотеплового излучения земных и ледовых покровов с борта вертолётки с последующей комплексной обработкой данных.

Результаты теоретических исследований и измерений в наземных и лётных экспериментах, проведённых учёными академии в кооперации с коллегами Академии Наук, промышленности, Академии гражданской авиации опубликованы в соавторстве в монографиях [5; 6]:

Важный вклад в развитие гидрографии, гидрологии, метеорологии, морской навигации, изучение ледовых образований и решение практических задач для Морского Флота был сделан с использованием аппаратных комплексов активной радиолокации, размещённых на борту авиационных и космических носителей [7; 8; 9].

В качестве примеров приведём результаты применения космических радиолокационных станций для изучения и практического использования в интересах Морского Флота.

Первый пример связан с разработками в Харьковском институте радиофизики и электроники Академии наук УССР в области космического радиолокационного землеобзора, где много лет работал коллектив учёных и инженеров – наших партнёров под руководством д.т.н. Калмыкова А.И. Они разработали и изготовили несколько радиолокационных станций космического базирования. Одна из них — некогерентная РЛС бокового обзора была установлена на искусственном спутнике «Космос-1500», который назывался «Океан» и был запущен в сентябре 1983 года. С его помощью были спасены караван судов, затёртых льдами в районе полуострова Чукотка в октябре 1983 года, и дизель-электроход «Михаил Сомов», также попавший в ледовый плен у берегов Антарктиды в 1985 году.

Вторая разработка этого коллектива – космическая радиолокационная станция с синтезированной антенной (РСА) и её запуск ракетой-носителем «Протон» на борту аппарата «Космос-1870», который назывался «Алмаз».

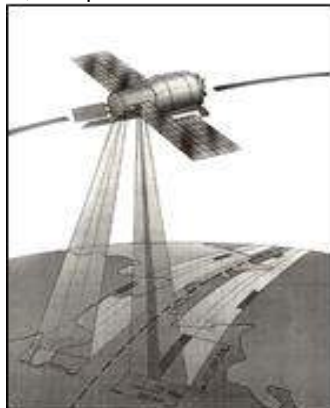


Рис.4. Первая в стране когерентная РСА с двумя полосами обзора освещала с космической орбиты

фоно-целевую обстановку на земной и морской поверхностях с высоким разрешением.

Радиолокационные изображения различных регионов Земли (Рис.5, а) и Тихого океана (Рис.5, б), сделанные РСА с борта КА «Алмаз» в разные годы, служат изучению фоно-целевой обстановки для использования в практических целях.



Рис. 5, а. 22.06.1989 г. Дельта реки Волги.



Рис. 5, б. 01.09.1987 г. Картина волнения в Тихом океане

На Рис. 5, а хорошо видны поля, жилые массивы. На Рис. 5, б отчётливо видны системы крупных волн и более мелких волновых структур с другим направлением их движения по сравнению с крупными волнами.

Не менее заметны малоконтрастные образования естественного происхождения. Для нас этот факт является ещё одним практическим подтверждением возможности получения качественных изображений морского волнения с помощью радиолокационных станций с синтезированной апертурой.

Приведённые краткие материалы исследований и испытаний могут послужить основой для развёртывания цикла работ в продолжение теоретических исследований и создания современных аппаратных и вычислительных комплексов берегового, корабельного, авиационного и космического базирования. Использование существующего задела и возможностей современных информационных технологий, методов математического моделирования позволят организовать проведение экспериментальных работ по измерению радиофизических параметров фоно-целевой обстановки на земной и морской поверхностях в интересах решения практических задач для Морского Флота России.

В современных внешних и внутренних политических и экономических условиях критически важным является создание отечественной Системы дистанционного наблюдения фоно-целевой обстановки на океанских акваториях для обеспечения национальных интересов России при активизации процесса международного освоения и развития Северного морского пути, освоения природных богатств в шельфовой зоне арктических

районов в соответствии с Федеральной и Международной программами освоения Арктики. Создание подобной системы в соответствии с предложенной Концепцией и использованием имеющегося научного и практического задела может

стать одним из важных элементов инфраструктуры, призванной обеспечить масштабные работы по добыче, транспортировке и переработке углеводородов на протяжении всего северного побережья Российской Федерации.

#### Литература

1. Евсеев В.И. Очерк истории прикладной радио- и оптической локации. – СПб.: НТЦ им. Л.Т. Тучкова, 2007. сс. 317-322.
2. Тепловое радиоизлучение ледяного покрова в СВЧ диапазоне / Л.Т. Тучков, А.Е. Башаринов, М.А. Колосов, А.А. Курская. – Труды ГГО, 1969, вып.222.
3. Шутко А.М. Исследование поверхности акваторий методами СВЧ радиометрии. Радиотехника и электроника, т. 23, № 10, 1978.
4. А.А. Загородников. Радиолокационная съёмка морского волнения с летательных аппаратов. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. 240 с.
5. Радиолокационные методы исследования Земли / Под ред. проф. Ю.А. Мельника. – М.: Сов. радио, 1980. 262 с.
6. В.В. Богородский, Д.Б. Канарейкин, А.И. Козлов. Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. 280 с.
7. И.В. Кравченко. Лётчику о метеорологии. 4-е изд., испр. и доп. – М.: Воениздат, 1982. – 255 с.
8. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 279 с.
9. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Сканэкс, 1997. 296 с.

#### References

1. Evseev V.I. Oчерk istorii prikladnoij radio- i opticheskoj lokatsii. Sankt-Peterburg, NTC im. L.T. Tuchkova, 2007. pp. 317-322.
2. L.T. Tuchkov, A.E. Basharinov, M.A. Kolosov, A.A. Kurskaja. Teplovoe radioizluchenie ledjanogo pokrova d SVCh diapazona. Trudy GGO, 1969, vyp. 222.
3. Shutko A.M. Issledovanie poverhnosti akvatorij metodami SVCh radiometrii. Radiotehnika I Elektronika, t. 23, №10, 1978.
4. A.A. Zagorodnikov. Radiolokacionnaja s"jomka morskogo volnenija s letatel'nyh apparatov. Gidrometeoizdat, 1978, 240 p.
5. Radiolokacionnye metody issledovanija Zemli. Pod red. prof. Ju. A. Mel'nika. Sov. Radio, 1980, 262 p.
6. V. V. Bogorodskij, D. B. Kanarejkin, A.I. Kozlov. Poljarizacija rassejannogo I sobstvennogo radioizluchenija zemnyh pokrovov. Gidrometeoizdat, 1981, 280 p.
7. I.V. Kravchenko. Ljotchiku o meteorologii. 4-e izd., ispr. i dop. Voenizdat, 1982, 255 p.
8. Kondrat'ev K. Ja., Timofeev Ju. M. Meteorologicheskoe zondirovanie atmosfery iz kosmosa. Gidrometeoizdat, 1978, 279 p.
9. Garbuk S. V., Gershenzon V. E. Kosmicheskie sistemy distancionnogo zondirovanija Zemli. Skaneks, 1997, 296 p.

**УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

УДК 681.518.3

**СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ  
БУКСИРОВОЧНОЙ ТЕЛЕЖКИ ДЛЯ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ В  
ОПЫТОВОМ БАССЕЙНЕ****Геннадий Викторович Андерсон**

Начальник стенда

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44

e-mail: 10\_otd@ksrc.ru

**Павел Михайлович Орлов**

аспирант кафедры систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3

e-mail: orlov\_p\_m@mail.ru

**Виталий Михайлович Сидоров**

аспирант кафедры систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3

e-mail: v\_sidorov@ksrc.ru

**Юрий Леонардович Сиек**доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Систем автоматического управления  
и бортовой вычислительной техники

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3

e-mail: siek@mail.ru

**Аннотация**

В статье рассматривается возможность повышения точности гидродинамических испытаний на существующем экспериментальном стенде опытового бассейна. Представлено описание существующего экспериментального стенда буксировочной тележки глубоководного опытового бассейна, а также рассмотрен применяемый метод первичной обработки сигнала для определения гидродинамических параметров при испытании моделей подводных объектов. Произведен анализ метода оценки мгновенного значения частоты сигнала и применяемого оборудования для измерения на стенде. Предложена структура информационно-измерительной системы для модернизации экспериментального стенда в целях повышения точности измерений гидродинамических характеристик на основе расширения номенклатуры измерительных преобразователей, использования метода оценки мгновенного значения частоты сигнала и применения комплексирования измерений физических величин и их обработки в масштабе реального времени. Определено основное направление для модернизации стенда, а именно разработка программно-алгоритмического обеспечения информационно-измерительной системы.

**Ключевые слова:** информационно-измерительная система, методы измерения, экспериментальный стенд, опытовый бассейн.

**THE STRUCTURE OF THE INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF A  
TOWING CARRIAGE FOR MODEL TESTING IN AN EXPERIMENTAL TANK****Gennadiy V. Anderson**

Chief of a testing bench

FSUE "Krylov State Research Center"

196158, St. Petersburg, Moskovskoye shosse, 44

e-mail: 10\_otd@ksrc.ru

**Pavel M. Orlov**

Postgraduate Student, Department of Automatic Control Systems and On-Board Computing

St. Petersburg State Marine Technical University

190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3

e-mail: orlov\_p\_m@mail.ru

**Vitaly M. Sidorov**

Postgraduate Student, Department of Automatic Control Systems and On-Board Computing

St. Petersburg State Marine Technical University

190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya, 3

e-mail: v\_sidorov@ksrc.ru



**Yuri L. Siek**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Head of the Department of Automatic Control Systems and On-board computing  
 St. Petersburg State Marine Technical University  
 190008, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
 e-mail: siek@mail.ru

**Abstract**

The article reviews the potential for increasing the accuracy of hydrodynamic tests at the existing test bench of the experimental tank. A description of the existing test bench of the towing carriage of the deep-water experimental tank is given; and also the method of primary signal processing used to determine the hydrodynamic parameters when testing models of underwater objects is reviewed. An analysis of the method for estimating the instantaneous value of the signal frequency and the equipment used for measuring at the test bench was carried out. The structure of the information measuring system for upgrading the test bench was proposed in order to improve the accuracy of hydrodynamic characteristics measurements based on expanding the range of measuring transducers, using the method of estimating the instantaneous value of the signal frequency and applying integration of measurements of physical values and their processing in real time scale. The main trend for modernization of the test bench, namely development of software and algorithmic support of information-measuring system, is given.

**Keywords:** information measuring system, measurement methods, test bench, experimental tank.

**Введение**

Развитие такой ведущей отрасли промышленности, как судостроение, в значительной мере связано с необходимостью получения наиболее точных результатов измерений при модельных испытаниях морских подвижных объектов (МПО) на экспериментальных стендах опытовых бассейнов. Такие испытания являются наиболее распространённым видом гидродинамических исследований для получения характеристик моделей МПО. Данные испытания проводятся во всех крупнейших опытовых бассейнах мира: глубоководный опытовый бассейн ФГУП «Крыловского государственного научного центра», Россия; опытовый бассейн DTMB Дэвида Тейлора, США; лаборатория SSPA, университет Chalmers, Швеция; исследовательский институт судостроения MARIN, Нидерланды; опытовый бассейн Гамбурга,

HSVA, Германия. На рис.1 представлены стенды крупнейших опытовых бассейнов мира. Экспериментальный стенд глубоководного опытового бассейна (ГОб) ФГУП «Крыловского государственного научного центра» представляет собой движущуюся по рельсам буксировочную тележку (БТ), на которой размещены экспериментальные установки и управляющий экспериментом персонал. Вес БТ может достигать 60 тонн, а скорость перемещения 18 м/с. Основной характеристикой таких стендов является точность определения гидродинамических параметров МПО. На величину, которой влияет большое количество факторов связанных с использованием первичных преобразователей и методов измерения, а так же влияние внешнего воздействия на экспериментальный стенд.

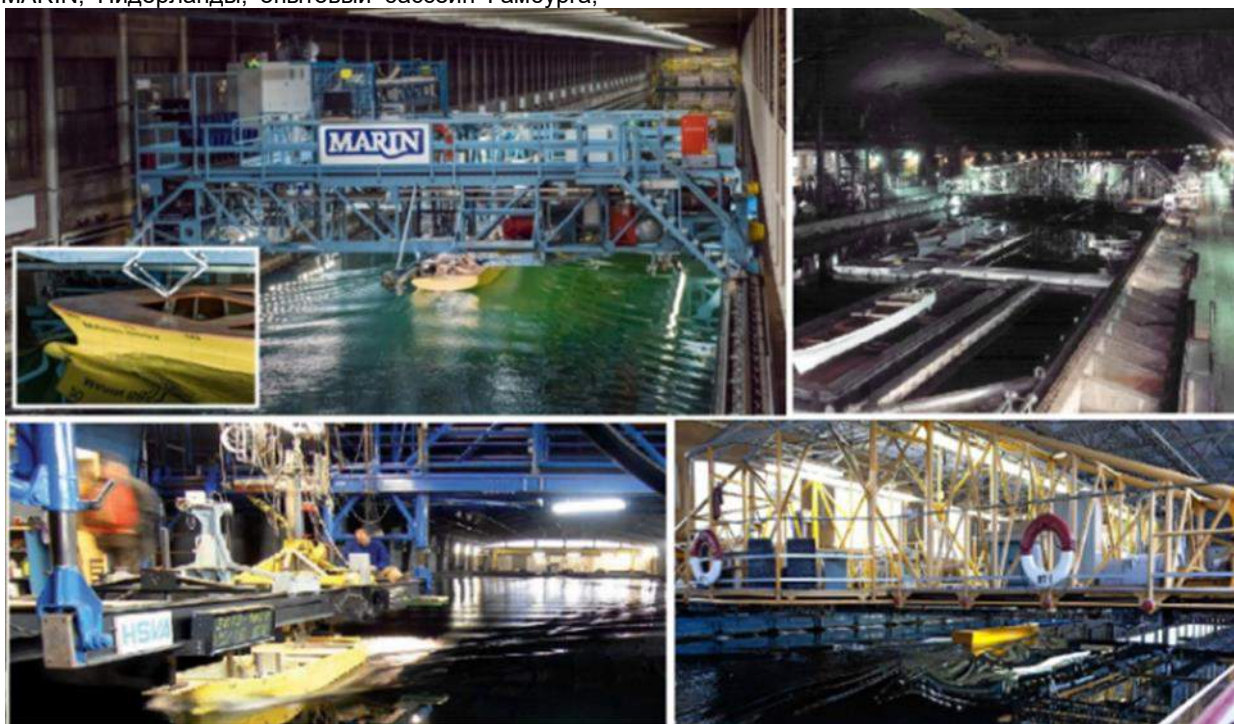


Рис.1. Стенды крупнейших опытовых бассейнов в мире (MARINE, DTMB, HSVA, Krylov-Centre).

В настоящее время разработаны, внедрены и широко применяются информационно-измерительные системы (ИИС) в составе программно-аппаратных комплексов [1] для автоматизированного проведения гидродинамических испытаний с измерением статических сил и давлений в опытовых бассейнах. В связи с развитием микропроцессоров и увеличением вычислительных мощностей, появилась возможность расширять используемые ИИС в части программно-алгоритмического обеспечения для обработки получаемой информации об исследуемом объекте.

**1. Описание экспериментального стенда**

Экспериментальный стенд, структурная схема которого представлена на рис. 2, представляет собой подвижную БТ, установленную на восьми попарно подключенных к двигателям постоянного тока (ДПТ) 2 колесах 1. На данной тележке смонтировано следующее оборудование: установка свободной воды для испытания моделей гребных винтов рассмотренная более подробно авторами в других работах, например в [2], установка 10 для измерения буксировочного сопротивления ЭУ-70, преобразователь линейной скорости П-173 13, аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) 6, согласующее устройство (СУ) 12 и бортовой ЭВМ 11. Установка ЭУ-70 позволяет определять сопротивление погруженных моделей при скоростях буксировки до 18 м/с. Комплект силоизмерительных элементов рассчитан на величину полного сопротивления модели до 5000 Н. Установка состоит из неподвижной платформы 4 с закрепленными на ней носовым и кормовым ножами 9 и 7. Расстояние

между ножами и их заглубление может изменяться в зависимости от конструкции модели и условий испытаний. При измерении буксировочного сопротивления модель 3 крепится к носовому ножу через носовой силоизмерительный двухкомпонентный ножевой динамометр 8, а к кормовому силоизмерительному однокомпонентному ножевому динамометру 5 через специальную так называемую «плавающую опору», поддерживающую модель в вертикальном направлении и не воспринимающую продольные силы. Динамометр 8 преобразует продольную (направленную вдоль оси модели) силу в электрический частотно модулированный (ЧМ) сигнал, который СУ 12 конвертирует по напряжению и длительности импульса в формат, совместимый с TTL (transistor-transistor logic). Преобразованный сигнал представлен на рис. 3. Далее сигнал поступает на АЦП, который является 32 канальным устройством цифрового ввода-вывода NI PCIe-6536. Затем АЦП преобразует измеренное значение в цифровой код и передает для обработки в бортовой компьютер БТ. Разность между измеренными значениями при нагруженном динамометре и без нагрузки пропорциональна силе, действующей на модель. Коэффициент пропорциональности определяется тарировкой. Опора кормового ножа позволяет модели свободно перемещаться в продольном направлении, поэтому влияние трения в ней на измерения пренебрежимо мало.

Скорость движения БТ и модели, связанной с ней, определяется относительно рельса с помощью смонтированного на платформу преобразователя линейной скорости П-173.

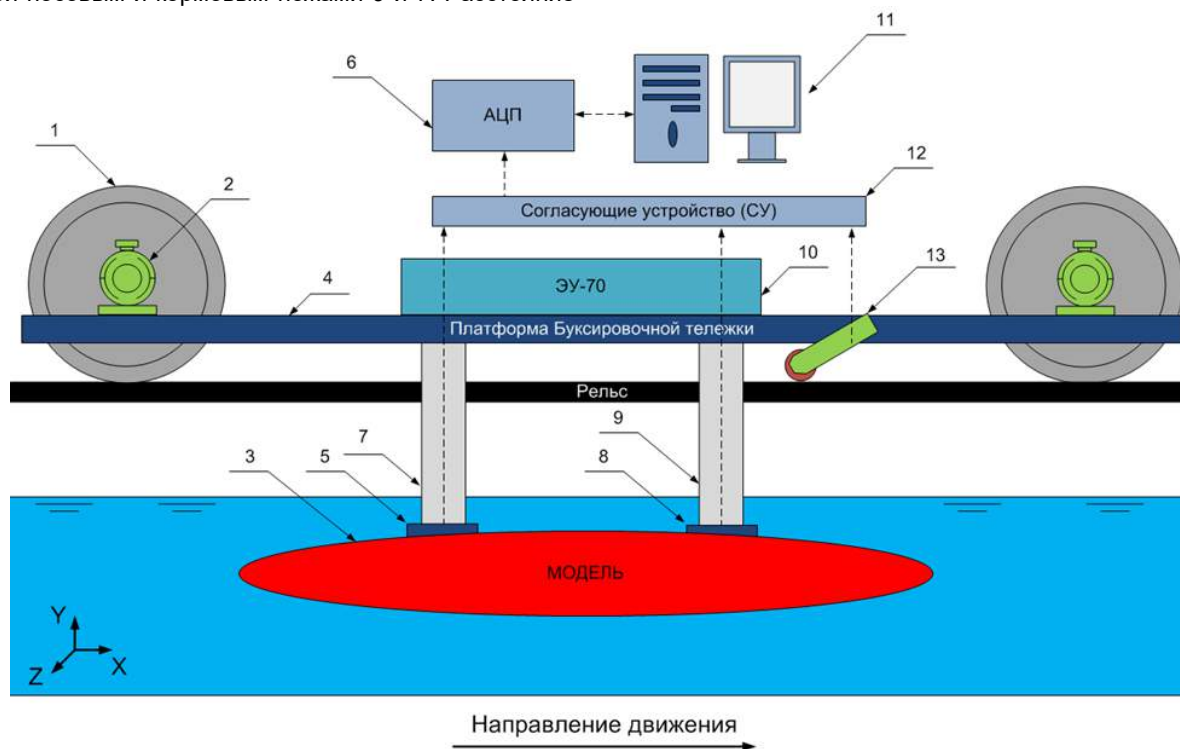


Рис.2. Структурная схема экспериментального стенда

1 - Колесо БТ; 2 – электродвигатель БТ; 3 – модель; 4 – платформа БТ; 5 - силоизмерительный однокомпонентный ножевой динамометр «П-168»; 6 – аналогово-цифровой преобразователь; 7 – кормовой нож; 8 - силоизмерительный двухкомпонентный ножевой динамометр «П-159»; 9 - носовой нож; 10 - установка ЭУ-70; 11 - бортовой ЭВМ БТ; 12 - согласующее устройство; 13 - преобразователь линейной скорости П-173.

Посредством П-173 линейная скорость первоначально преобразуется в угловую скорость, а затем последняя трансформируется в ЧМ сигнал. Абсолютная погрешность измерения скорости обусловлена допуском на диаметр ролика и не превышает 0,0001 м/с. Длина его окружности равна 500 мм, а число импульсов ЧМ сигнала на оборот ролика равно 500. Порог чувствительности 1 мм/с. Зависимость частоты выходного сигнала от скорости

$f(\Gamma\text{ц}) = 1000 * V$ . Напряжение выходного сигнала не менее 2,5 В. Поскольку диаметр колеса известен, определение частоты его вращения позволяет вычислить и скорость движения БТ. Силоизмерительный однокомпонентный ножевой динамометр «П-168» имеет следующие характеристики: начальное значение частоты электрического сигнала преобразователя  $f_0 = 4251 \Gamma\text{ц}$ ; чувствительность преобразователя  $\gamma = 1,0916 \Gamma\text{ц}/H$ ; влияние вертикальной силы Y на X равно  $\delta_{\text{вл.}} = 0,53\%$ ; питание схемы датчика -10 В. Силоизмерительный двухкомпонентный ножевой динамометр «П-159» обладает далее перечисленными характеристиками: начальное значение частоты электрического сигнала преобразователя:  $f_{x0} = 4061 \Gamma\text{ц}$ ,  $f_{y0} = 4662 \Gamma\text{ц}$ ; чувствительность преобразователя  $\gamma_x = 1,152 \Gamma\text{ц}/H$ ;  $\gamma_y = 0,867 \Gamma\text{ц}/H$ ; влияние вертикальной силы Y на X равно  $\delta_{\text{вл.}} = 0,21\%$ ; питание схемы датчика -10 В. Указанные средства измерения поверяются в установленные сроки и их метрологические характеристики могут изменяться между ними.

**2. Направления модернизации стенда**

В настоящее время для определения гидродинамических параметров при первичной обработке сигнала практикуют метод усреднения. Который соответствует существующим методикам и рекомендованным нормативам международной конференции опытовых бассейнов (ИТТС), предъявляемым к измерению гидродинамических величин при проведении эксперимента. Но, несмотря на традиционность использования данного метода первичной обработки, существует возможность повышения достоверности результатов для ряда режимов гидродинамических экспериментов за счет модернизации ИИС. Например, к измерениям сопротивления на буксировочных испытаниях при малых числах Фруда, когда нестабильность движения БТ может вызвать неустойчивость обтекания корпуса судна, а малость измеряемых величин приводит к увеличению доли ошибок измерения в результирующую величину. На самоходных испытаниях критичным, в смысле достоверности, является режим вблизи точки «свободного самохода». При определении коэффициента засасывания на данном режиме вычисляется разность близких величин. Определенные сложности вызывает измерение скорости потока гидродинамическими зондами в областях сильно подторможенного течения, когда для натекания потока на зонд может быть значительным и становиться ощутимым вклад турбулентной добавки в результирующее

гидродинамическое давление, воспринимаемое трубками зонда.

Наиболее очевидными путями преодоления этих сложностей является повышение стабильности скорости движения БТ, точности измерительных приборов, причём во всем диапазоне измеряемой величины. Однако их технико-экономическая целесообразность имеет предел, так как при достижении определенного уровня экспериментальных средств их дальнейшее совершенствование сопряжено с возрастающими трудностями. Это особенно верно для столь громоздких, сложных, характеризующихся неблагоприятными условиями (повышенная влажность, вибрация) экспериментальных сооружений, какими являются опытовый бассейн и БТ. Поэтому, не оспаривая необходимость совершенствования экспериментального оборудования, предлагается, рационально используя математическое описание экспериментального стенда, повысить точность на основе решения задач идентификации и фильтрации. Что в свою очередь заставляет перейти к рассмотрению выходных сигналов применяемых первичных преобразователей, методов измерения и смонтированной аппаратной части стенда.

**3. Анализ метода измерения частоты**

Основная масса датчиков и динамометров отечественного производства, задействованная в процессе гидродинамического эксперимента имеет выходной ЧМ сигнал, пропорциональный измеряемой физической величине. Построение таких датчиков в большинстве случаев основано на изменении параметров частото задающих цепей LC генераторов под действием измеряемых факторов [3]. Выходной сигнал, изображенный на рис. 3, представляет собой набор прямоугольных импульсов с довольно размытыми фронтами [4] разной длительности и постоянной скважности. Такая форма сигнала позволяет получать среднее значение измеряемой статической величины силы, воздействующей на исследуемый объект, в процессе гидродинамических испытаний.

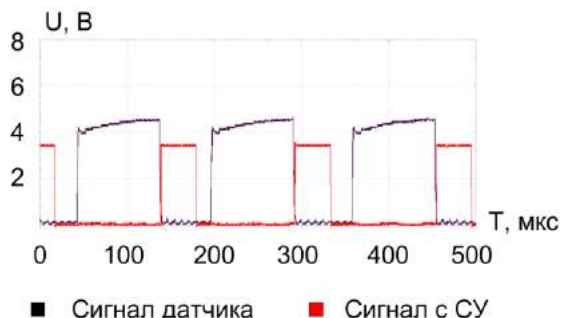


Рис.3. Частотно модулированные сигналы.

Измерение ЧМ сигнала выполняется путем подсчета количества импульсов с измерительного преобразователя за интервал времени методом дискретного счета [5]. Подсчет количества импульсов обеспечивается выбором частоты дискретизации ЧМ сигнала. Которая рассчитывается по теореме Котельникова (Найквиста). Время измерения одного пробега БТ при проведении испытаний в ГОБ зависит от: длины пробега, ускорения и маршевой скорости



БТ. В зависимости от этих параметров, временной интервал выбирается в диапазоне от 10 секунд до нескольких минут. По истечению времени измерения, прибегнув к формуле:

$$f_{\text{сиг.}} = \frac{N_{\text{имп.}}}{T_{\text{изм.}}} \quad (1),$$

где  $T_{\text{изм.}}$  – временной интервал измерения,

$N_{\text{имп.}}$  - количество посчитанных импульсов,

производится расчет среднего значения частоты  $f_{\text{сиг.}}$  сигнала поступившего с измерительного преобразователя. Имея коэффициент пропорциональности и начальную частоту сигнала, вычисляется среднее значение действующей силы  $P$  на измерительный преобразователь за время  $T_{\text{изм.}}$  по формуле:

$$P = (f_{\text{сиг.}} - f_0) \cdot K \quad (2),$$

где  $f_0$  – начальная частота с измерительного преобразователя без нагрузки,

$K$  – коэффициент пропорциональности нагрузки к значению частоты ЧМ сигнала.

По одному значению, полученному методом дискретного счета, невозможно определить характеристики случайных процессов, которые добавляют зашумленную составляющую в полезный сигнал в процессе эксперимента. Для повышения точности можно перейти к многократным измерениям [6], по сути, к  $N$ -кратным повторениям аналогичных измерений, но это приведет к увеличению пробегов БТ и повышению трудоемкости испытаний.

Измерение не усредненных величин связано с получением и обработкой ЧМ сигнала в процессе эксперимента методом оценки мгновенного значения частоты [3]. Информативной составляющей является период каждого импульса сигнала, представленного на рис. 3, генерируемого измерительным преобразователем. Осуществление измерения неотъемлемо сопряжено с обеспечением чувствительности ИИС не более одного герца к изменению частоты на каждый период сигнала. Частота ЧМ сигналов, применяемых измерительных преобразователей, может достигать до 20 кГц. Поэтому для выбора частоты дискретизации с обеспечением заданной чувствительности, требуется вывод формулы для ее расчета. Для этого определим временную разницу  $t$  между периодами импульсов сигнала, отличающихся на 1 Гц:

$$t = \left(\frac{1}{f_i}\right) - \left(\frac{1}{f_{i-1}}\right) \quad (3),$$

где  $f_i$  – частота ЧМ сигнала,

$f_{i-1}$  – частота ЧМ сигнала отличающаяся на уменьшение в 1 Гц от  $f_i$ .

Подставив в формулу (1) выражение (3), получим формулу (4) для вычисления частоты дискретизации предполагаемого измеряемого сигнала:

$$F_d = \frac{1}{\left(\frac{1}{f_i}\right) - \left(\frac{1}{f_{i-1}}\right)} \quad (4).$$

Выполним расчет зависимости частоты дискретизации  $F_d$  от частоты сигнала с обеспечением заданной чувствительности к изменению частоты сигнала в диапазоне частот от 1 до 20 000 Гц. Результат расчета зависимости  $F_d(f_i)$  представлен на рис. 4.

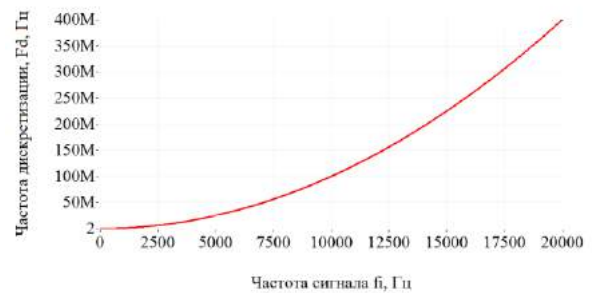


Рис. 4. График зависимости частоты дискретизации от частоты ЧМ сигнала.

Обратившись к документации по 32-х каналному устройству цифрового ввода-вывода NI PCIe-6536 [7], определим, что максимальное значение частоты дискретизации можно задать до 25МГц. Проведем перерасчет  $F_d$  до 25МГц. Как видно из рис. 5, выбирая частоту дискретизации 25 МГц, можно оцифровывать ЧМ сигналы до 5 кГц. Из этого следует, что измерение не усредненных величин с первичных преобразователей, применяя выбранный метод оценки мгновенного значения частоты, можно реализовать на существующей аппаратной части экспериментального стенда.

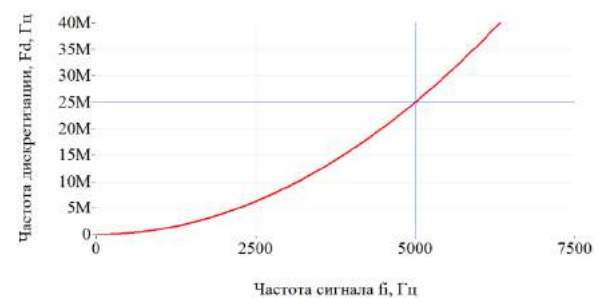


Рис. 5. График зависимости частоты дискретизации до 25МГц от частоты ЧМ сигнала.

Поэтому целесообразно отказаться от традиционного метода дискретного счета и перейти к использованию метода оценки мгновенного значения частоты, что в свою очередь позволит определять характеристики случайных процессов и исключать зашумленную составляющую из полезного сигнала в процессе эксперимента.

#### 4. Описание структуры ИИС

Предлагается структура ИИС согласно блок схеме на рис. 6, для обеспечения испытаний с измерением не усредненных величин на существующем стенде.



Рис.6. Структурная схема ИИС.

На структурной схеме представлены: датчик скорости; датчик силы X; датчик силы Y; акселерометры X,Y,Z; датчик перемещения; датчик тока; устройство сопряжения; Плата дискретного ввода-вывода; АЦП; блок синхронизации; интерфейс передачи данных; вычислительная среда с блоками «Предварительная идентификация», «Обработка результатов измерения в реальном времени»; устройство управления; программа верхнего уровня. Датчик перемещений предлагается реализовать на базе датчика линейной скорости П-173, изменив метод измерения сигнала и обработку получаемых данных. Так как длина окружности ролика и количество импульсов на оборот ролика известны, то при точном определении количества импульсов несложно определить пройденное расстояние экспериментального стенда с моделью. Акселерометры XYZ, установленные на платформе БТ в районе крепления носового ножа и в корпусе модели, измеряют ускорения платформы БТ и модели в трех осевой системе координат. Датчик тока измеряет ток якоря, возбуждаемый в приводных ДПТ посредством измерения напряжения с шунта цепи питания. Сигналы с датчиков скорости, сил и перемещения поступают на СУ. Далее СУ преобразует входящие ЧМ сигналы с переменной длительностью импульса, с постоянной скважностью в импульсный сигнал с переменной скважностью, амплитудой импульса 3,5 В и длительностью импульса 40 мкс., а затем передает эти импульсы в плату дискретного ввода-вывода. Графическое изображение входного и выходного сигнала с СУ, представлено на рис. 3. Сигналы с акселерометров и датчика тока передаются в АЦП, который

преобразует их в цифровой код. Обработанная информация с первичных преобразователей передается по цифровым каналам в блок синхронизации. Блок синхронизации производит согласованный запуск в фиксированный момент времени процесса измерения платой дискретного ввода-вывода, АЦП и реализует сбор данных с цифровых каналов. Затем отправляет результаты по интерфейсу передачи данных в вычислительную среду. Интерфейс передачи данных обеспечивает высокоскоростную и своевременную доставку результатов измерений. В вычислительной среде программно реализованы алгоритмы предварительной идентификации, обработки результатов измерений в реальном времени, а также слежения за превышением предельных значений применяемых средств измерения. В случае достижения максимально допустимых значений выбранного предела измерения применяемого первичного преобразователя, в процессе испытаний в устройстве управления задействуются алгоритмы адаптивного переключения диапазона измерения. Предварительная идентификация содержит математическую модель стенда и параметры, полученные вследствие предварительных экспериментов. Результаты предварительной идентификации задействуют в алгоритме оценивания, реализуемого в масштабе реального времени. Впоследствии обработанные результаты из вычислительной среды передаются в программу верхнего уровня. Подробное описание подобной программы приведено авторами в работе по автоматизации испытаний [1].

### Заключение

В статье рассмотрен существующий экспериментальный стенд БТ ГОБ с точки зрения применяемого оборудования и метода определения гидродинамических параметров при испытаниях МПО. Определены недостатки практикуемого метода усреднения при измерении частоты, не позволяющего определить характеристики случайных процессов, которые в свою очередь добавляют зашумленную составляющую в полезный сигнал. Предложено использовать метод оценки мгновенного значения частоты сигнала в целях повышения точности испытаний. Произведен анализ аппаратной части стенда и подтверждена возможность оценивания мгновенного значения частоты сигнала на оборудовании стенда. Также представлена структура ИИС для реализации испытаний с измерением не усредненных величин при гидродинамических испытаниях МПО. В дальнейшем для выполнения поставленной задачи по модернизации экспериментального стенда БТ ГОБ, требуется разработать программно-алгоритмическое обеспечение ИИС согласно предложенной структуре и определить аппаратные средства вычислительной среды ИИС.

### Литература

1. Иванова Я.В., Котлович В.М., Сидоров В.М. Автоматизация испытаний и численный расчет нормировочных характеристик гидродинамических зондов. // Труды Крыловского государственного научного центра. Т. 386, №4. 2018.

2. Орлов П.М., Сидоров В.М., Сиек Ю.Л., Чичерин И.А. Принципы модернизации экспериментальной установки для испытаний гребных винтов. // Морские интеллектуальные технологии. Научный журнал №4 (42) Т.1 2018.
3. Шишов О. В. Аналого-цифровые каналы микропроцессорных систем управления: учебное пособие / О. В. Шишов. – М.- Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 211 с.
4. Борусевич В.О., Русецкий А.А, Соловьев И.А. Современные гидродинамические лаборатории. – СПб.:ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2008.
5. Кукуш В.Д. Электрорадиоизмерения. –Москва: Радио и связь, 1985.
6. Пиотровский Я. Теория измерений для инженеров: Пер. с польск.-М.: Мир, 1989.
7. Технические характеристики NI PXIe/PCle-653x [Электронный ресурс] режим доступа: [http://www.ni.com/pdf/products/us/pcie\\_653x.pdf](http://www.ni.com/pdf/products/us/pcie_653x.pdf)

#### References

1. Ivanova Ya.V., Kotlovich V.M., Sidorov V.M. Avtomatizatsiya ispytaniy i chislenny raschet normirovochnykh kharakteristik gidrodina-micheskikh zondov [Test automation and numerical calculation of calibration paraeters for wake probes]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra, 2018, vyp. 4 (386) (in Russia).
2. Orlov P.M., Sidorov V.M., Siek Y.L., Chicherin I.A. Printsipy modernizatsii eksperimental'noy ustanovki dlya ispytaniy grebnykh vintov [Principles if propeller open-water testing facility modernization for test screws]. Marine intellectual technologies. N 4 (42) 2018 (in Russia).
3. Shishov O.V. Analog-digital channels of microprocessor control systems: school book for University. Moscow:DirectMedia, 2015.
4. Borusevich V.O., Rusetsky A.A., Soloviev I.A. Modern hydrodynamic laboratories. St. Petersburg: Central Research Institute. acad. A.N. Krylova, 2008.
5. Kukush V.D. Electroradio products: school book for University. Moscow: Radio and communication, 1985.
6. Piotrovskiy Ya. Measurement theory for engineers. Moscow, 1989.
7. Technical specifications NI PXIe/PCle-653x [http://www.ni.com/pdf/products/us/pcie\\_653x.pdf](http://www.ni.com/pdf/products/us/pcie_653x.pdf)

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И  
ПРОИЗВОДСТВАМИ**

УДК 621.316.97

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ СИСТЕМ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ****Алексей Михайлович Агафонов**

доцент кафедры электротехники и электрооборудования судов  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: kws@smtu.ru

**Александр Алексеевич Воршевский**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электротехники и электрооборудования судов  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: elemcom@smtu.ru

**Петр Александрович Воршевский**

старший преподаватель кафедры электротехники и электрооборудования судов  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: elemcom@smtu.ru

**Евгений Сергеевич Гришаков**

инженер 2 категории кафедры электротехники и электрооборудования судов  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: grishakove@mail.ru

**Юрий Александрович Губанов**

доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и электрооборудования судов  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: mail@avrorasystems.ru

**Аннотация**

Результатом воздействия электростатического разряда (ЭСР) являются сбои в работе технических средств (ТС) и даже выход их из строя. Требования нормативных документов по электромагнитной совместимости (ЭМС) обязывают осуществление проверки функционирования ТС при воздействии ЭСР. Испытания на устойчивость к ЭСР могут быть проведены с помощью существующих имитаторов ЭСР. При проектировании ТС предлагается использовать представленную модель воздействия ЭСР для оценки возможных напряжений и токов на металлическом корпусе ТС, электромагнитных полей, проникающих внутрь корпуса, наведенных напряжений внутри корпуса с целью прогнозирования результатов испытаний. Приведены результаты моделирования и экспериментальное подтверждение полученных данных воздействия ЭСР в крышку металлического корпуса ТС. Представленные современные методы защиты от ЭСР и рекомендации по проектированию ТС с учетом ЭСР призваны решить проблему обеспечения ЭМС в условиях ЭСР. Рассмотренные вопросы возникновения, воздействия ЭСР на ТС, моделирования этих процессов, испытаний и защиты от ЭСР важны для обеспечения нормального функционирования систем интеллектуального управления в судовых условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** электростатический разряд, импульс тока, перенапряжения, интеллектуальные технологии, электромагнитная совместимость, испытания, математическая модель, помехоустойчивость.

**ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF INTELLIGENT CONTROL  
SYSTEMS UNDER THE INFLUENCE OF ELECTROSTATIC DISCHARGES****Aleksei M. Agafonov**

Associate Professor at the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships St. Petersburg  
State Marine Technical University  
190121, St. Petersburg, st. Lotsmanskaya, 3  
e-mail: kws@smtu.ru

**Alexander A. Vorshevsky**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships

St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: elemcom@smtu.ru

**Petr A. Voroshevsky**

Senior Lecturer at the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: elemcom@smtu.ru

**Evgeny S. Grishakov**

Engineer, category 2, Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: grishakove@mail.ru

**Yuri A. Gubanov**

Dr.Sci.Tech, Professor, Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: mail@avrorasystems.ru

**Abstract**

The effects of electrostatic discharge (ESD) cause malfunctions in the operation of technical means (TM) and even their failure. The requirements of regulatory documents for electromagnetic compatibility (EMC) oblige the implementation of functioning test for TM exposed to ESD. ESD resistance tests can be performed using existing ESD simulators. When designing TM, it is proposed to use the presented model of ESD exposure to estimate possible voltages and currents at the metal case of the TM, electromagnetic fields penetrating inside the case, induced voltages inside the case in order to predict test results. The results of modeling and experimental proof of the obtained data from the impact of ESD in the cover of the metal case of the TM are given. The presented modern methods of protection from ESD and recommendations on designing the TM with regard to ESD are called to solve the problem of providing EMC under conditions of ESD. The discussed issues on the occurrence, effects of ESD to TM, modeling of these processes, testing and protection from ESD are important for ensuring the normal operation of intelligent control systems in shipboard operating conditions.

**Keywords:** electrostatic discharge, current pulse, overvoltage, intelligent technology, electromagnetic compatibility, testing, mathematical model, noise immunity.

**Введение**

Системы интеллектуального управления улучшают технические характеристики судовых технических средств (ТС), позволяют автоматизировать многие технологические процессы, что ведет к сокращению обслуживающего персонала, а следовательно уменьшению затрат. С другой стороны, увеличение быстродействия, миниатюризация устройств, приводит к уменьшению размеров полупроводниковых структур, ширины переходов, толщины оксидной изоляции, размеров контактов, снижает устойчивость устройств к импульсным напряжениям.

По данным Мосэнерго и зарубежных источников до 80 % отказов в работе микропроцессорных систем связано с перенапряжениями, одной из причин которых являются ЭСР [1]. Опыт испытаний лаборатории технических средств по электромагнитной совместимости (ЭМС) СПбГМТУ показывает, что ТС с первого предъявления редко удовлетворяет требованиям по устойчивости к помехам. ЭСР вызывали отключение дизеля, нарушение работы электронно-картографической навигационно-информационной системы, выключение компьютеров, потери управления системами судна.

Воздействие ЭСР на ТС возможно непосредственное и косвенное [2]. При непосредственном воздействии заряд, накопленный на теле человека, разряжается на ТС. Возникающий переходный процесс индуцирует токи и напряжения,

приложенные к электронным компонентам. Косвенное воздействие связано с излучаемыми электромагнитными полями, возникающими при ЭСР, которые наводят на проводниках импульсные напряжения.

Решению проблемы ЭСР посвящено большое количество исследований, тематика обеспечения совместимости ТС в условиях ЭСР является актуальной для разработчиков, производителей электронного оборудования и для всех отраслей, применяющих такое оборудование, включая судостроительную промышленность. Увеличение быстродействия электронных компонентов обостряет проблему сбоев ТС от воздействия ЭСР. Многолетний опыт проведения испытаний судового оборудования подтверждает, что воздействие ЭСР является одним из наиболее опасным фактором для цифровой техники, на основе которой и создаются системы интеллектуальных технологий. Российский морской регистр судоходства требует проведение испытаний судовых ТС на устойчивость к ЭСР.

**1. Возникновение ЭСР**

Накопление электростатического заряда происходит в результате процессов, протекающих при деформации, трении, распылении, резком отрыве твердых, жидких и газообразных веществ. Чаще всего под ЭСР подразумевается разряд с человека на корпуса приборов, органы управления, разъемы, мебель, а также возможны разряды между предметами. Величина заряда зависит от

относительной влажности воздуха, свойств диэлектрика (подшвы обуви, ковра, одежды), отделяющего заряженный объект от проводящей поверхности, электрической емкости относительно земли, от характера и скорости движения. В зависимости от условий окружающей среды потенциал человека может достигать 30 кВ. Наибольшие напряжения наблюдаются в случае перемещения по синтетическому ковру или резине при низкой влажности воздуха. При вставании со стула напряжение заряда может достигать 6 кВ. Извлечение из пластиковой упаковки предметов с диэлектрическим корпусом также может дать заряд с напряжением до 20 кВ, при повышении относительной влажности с 20 до 40% напряжение заряда уменьшается примерно в два раза. Человеческое тело проявляет себя как конденсатор емкостью от 100 до 200 пФ. Наихудшие условия для электрооборудования по устойчивости к ЭСР наблюдаются на судах, работающих в северных широтах, где низкая влажность способствует накоплению большого заряда.

Человек при разряде статического электричества может быть представлен схемой на рис. 1. Рука вызывает появление первоначального пика тока и эквивалентируется емкостью  $C_p=7-15$  пФ, индуктивностью  $L_p=0,1$  мкГн, резистором  $R_p=20-200$  Ом. Тело человека определяет в основном длительность разряда и замещается емкостью  $C_ч=80-300$  пФ, индуктивностью  $L_ч=0,5-2$  мкГн, резистором  $R_ч=150-1500$  Ом. Следует отметить, что  $C_ч \gg C_p$ .

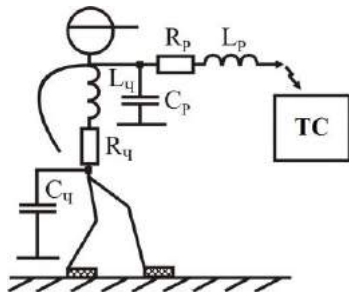


Рис. 1. Модель электростатического разряда

При приближении руки человека, заряженного до высокого напряжения, к металлическому оборудованию происходит пробой воздуха между рукой и корпусом ТС на расстоянии в несколько миллиметров. Разряд статического электричества с тела человека вызывает протекание кратковременных импульсов тока (длительность фронта от сотен пикосекунд до нескольких наносекунд) с амплитудой в несколько десятков ампер и длительностью импульса до 100 нс. Параметры тока зависят от уровня напряжения и параметров цепи разряда. Форма разрядного тока импульса ЭСР представлена на рис. 2.

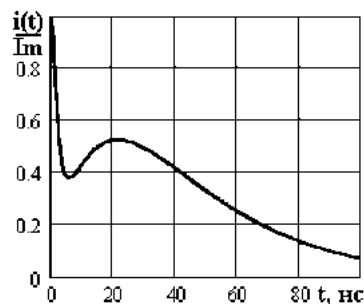


Рис. 2. Форма разрядного тока импульса ЭСР

Наиболее короткие фронты разряда достигаются при быстром приближении руки к точке разряда и при наличии в руке металлического предмета, например, отвертки. Максимальная крутизна тока может достигать при этом 100 А/нс. Спектр тока разряда простирается до сотен мегагерц [3].

## 2. Воздействие ЭСР

Наибольшую опасность для ЭО представляет непосредственный разряд в электронные компоненты. Для большинства элементов критическим значением напряжения ЭСР является 2 кВ. Поражающую способность определяет быстрое нарастание напряжения и тока. При протекании токов через микросхемы, возникают перенапряжения, которые и вызывают отказы в работе ТС.

В современной технике функцию по управлению всем изделием выполняет микроконтроллер (МК). Выход из строя или некорректная работа МК может привести к серьезным последствиям. В результате воздействия ЭСР в структуре МК могут возникнуть повреждения, которые обнаруживаются наиболее легко, потому что поврежденное изделие не выполняет своих функций. Наиболее неприятные последствия вызывают скрытые повреждения, которые затрагивают один и более параметров или вызывают некоторые изменения начальных характеристик, которые могут не выходить за рамки допустимых отклонений. Обнаружить такие повреждения достаточно трудно, т. к. они проявляются лишь в результате повторяющихся разрядов или в процессе эксплуатации [4]. Пример скрытого повреждения радиометки после испытаний на устойчивость к ЭСР представлен на рис. 3. Образцы радиометок оставались работоспособными после испытаний, но в процессе эксплуатации давали сбои и окончательно вышли из строя.

Общепринято существование шести наиболее распространенных и связанных с электростатическим разрядом механизмов отказов: тепловой вторичный пробой, расплавление металлизации, объемный пробой, пробой диэлектрика, поверхностный пробой и газовый дуговой разряд [2].

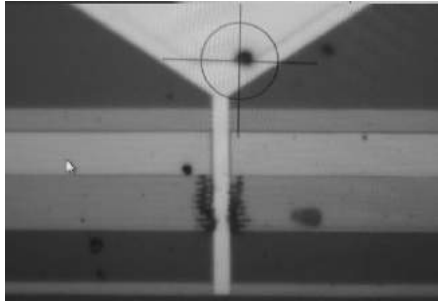


Рис.3. Дефекты радиометки после испытаний на воздействие ЭСР амплитудой 4 кВ

Электростатический разряд в соседние металлические предметы или в корпус ТС создает импульсное электромагнитное поле, которое воздействует на внутренние цепи ТС (рис. 4).

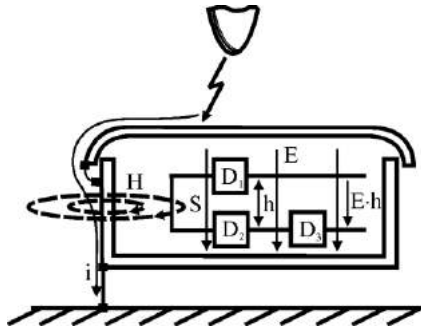


Рис.4. Воздействие ЭСР на корпус ТС

Длительность этих импульсов определяется временем разряда емкости человека на ТС и может составлять десятки наносекунд, что достаточно для переключения современных цифровых микросхем. Статическая помехоустойчивость различных типов микросхем может быть от 0,2 В до половины напряжения питания  $U_{пит}$ . Динамическая устойчивость несколько выше (рис. 5), но наведенные напряжения информационных цепях и цепях питания могут значительно превышать уровни помехоустойчивости микросхем.

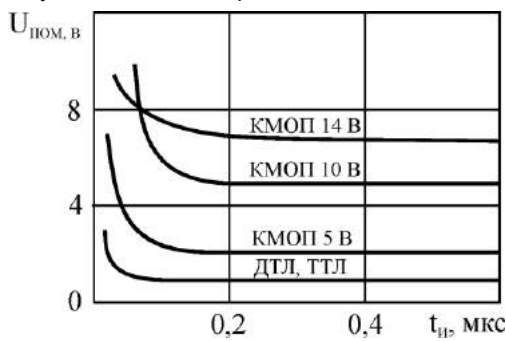


Рис.5. Уровни устойчивости  $U_{ном}$  микросхем к импульсам напряжения разной длительности  $t_{им}$

### 3. Математическое описание ЭСР

Проверка устойчивости ТС к воздействию ЭСР осуществляется экспериментально с использованием имитаторов ЭСР, соответствующих требованиям IEC 61000-4-2. Желательно иметь возможность смоделировать воздействие ЭСР в корпус ТС с целью прогнозирования результата воздействия. Форма тока ЭСР в модели должна

соответствовать параметрам ЭСР, создаваемой во время реальных испытаний. Схемы замещения испытательного генератора [5], корпуса и цепи заземления образуют схему, позволяющую рассчитать напряжение на корпусе и напряженность поля внутри корпуса (рис.6).

Использование модели позволяет правильно подобрать корпус и комплектующие при проектировании новых систем. На практике крышка корпуса ТС может иметь контакт с корпусом ТС, как по всей плоскости, так и вовсе не иметь контакта по различным причинам. На рисунке 7 представлена зависимость напряженности  $E$  от качества соединения крышки с корпусом. Наиболее удачным способом соединения крышки с корпусом ТС является контакт по всему периметру крышки или хотя бы контакт в каждом углу (на 4 болтах).

На практике возможно соединение крышки только проводником при отсутствии контакта по периметру из-за наличия краски или резинового уплотнения, что значительно увеличивает напряженность поля внутри корпуса.

Модель дает допустимую для практики погрешность, которая определяется в основном погрешностью используемых параметров (индуктивность, емкость, активное сопротивление) корпуса и цепи заземления.

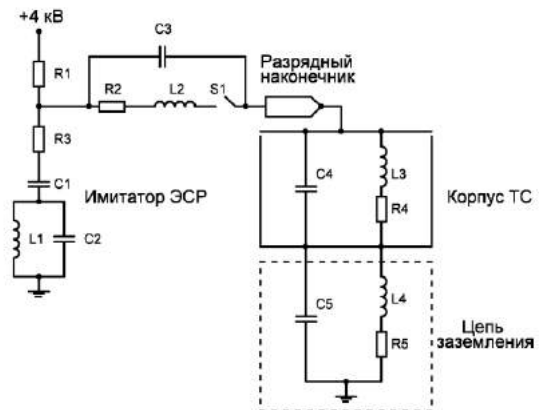


Рис. 6. Модель для исследования формы напряжения на корпусе и крышке оборудования



Рис. 7. Зависимости напряженности электрического поля внутри корпуса ТС для разных типов соединения крышки с корпусом

Измерения при ЭСР напряжения на корпусе размерами 480x480x160 мм и напряженности поля внутри корпуса подтвердили адекватность модели.



#### 4. Испытания на устойчивость к ЭСР

Стандарты IEC 61000-4-2, ГОСТ 30804.4.2-2013 устанавливает детальные требования к проведению испытаний на устойчивость к ЭСР. Проведение испытаний до установки на судно позволяет определить соответствие конкретного образца оборудования требованиям и возможность его одобрения. В качестве испытательного генератора используется имитатор ЭСР-8000К. Во время проведения лабораторных испытаний ТС должно быть установлено в действующей конфигурации; все кабели должны быть подключены к оборудованию и располагаться так же, как при нормальной эксплуатации. Даже если корпус хорошо защищает от ЭСР, то влияние ЭСР может быть связано с кабелями, которые служат приемными и передающими антеннами для поля ЭСР и тем самым способствуют проникновению его влияния на цепи внутри корпуса. Если экран кабеля сплошной, то он образует продолжение корпуса и уменьшает влияние ЭСР. Если же экран соединяется с корпусом проводником, то протекание тока ЭСР может создать напряжение на экране кабеля и на внутренних жилах кабеля, что также приводит к сбоям

#### 5. Обеспечению устойчивости технических средств к электростатическому разряду

Эффективным подходом к повышению устойчивости ТС к ЭСР является применение микросхем с повышенными помехоустойчивостью и напряжением питания, значения которых приведены в [3]. Снижение быстродействия схем до минимально допустимых значений, например, путем применения интегрирующих цепей, делает их не восприимчивыми в наносекундном напряжении.

Применение гальванической развязки в цепях передачи информации (оптической, инфракрасной, радиочастотной) обеспечивает наилучшую устойчивость этих цепей к ЭСР. Эффективны применение помехозащитного кодирования информации, использование нескольких каналов передачи, программные методы, например, перезапрос сомнительной информации.

Защита от ЭСР являются обязательной для современных ТС. Трассировка цепей должна быть направлена на то, чтобы токи помех протекали дальше от цепей обработки информации. Ограничители напряжения (стабилитроны, варисторы) устанавливаются параллельно защищаемой цепи. Выпускаются готовые решения для некоторых стандартных интерфейсов. Возможна защита линии с помощью RC или LC фильтра, если это допустимо для передаваемых сигналов. Установка синфазных дросселей позволяет устранить влияние на передаваемый сигнал при сохранении защиты от токов ЭСР.

Конструктивные методы защиты крайне важны. Необходимо стремиться к непрерывности экранирования цепей, обеспечиваемую в первую очередь корпусом. Может быть эффективным применение проводящей заземленной поверхности, полностью закрывающей высокочувствительную схему или модуль. Вентиляционные отверстия должны дополнительно перекрываться металлической заземленной сеткой с мелкими, до 1 мм ячейками. Высокочувствительные элементы должны быть максимально удалены от проводников, по которым может распространяться ток и напряжение разряда. Заземление щитовых приборов, установленных на дверях шкафов управления, необходимо осуществлять вне трассы питания и информационных связей. Соединение цепи заземления печатной платы с корпусом ТС осуществлять в одной точке, не допускается соединение составных частей корпуса через землю платы.

#### Заключение

Рассмотренные вопросы возникновения, воздействия ЭСР на ТС, моделирования этих процессов, испытаний и подходов по повышению устойчивости к ЭСР чрезвычайно важны для обеспечения нормального функционирования систем интеллектуального управления в судовых условиях эксплуатации

#### Литература

1. Гуревич В.И. Микропроцессорные реле защиты. Устройство, проблемы, перспективы. – М.: Инфра-Инженерия, 2011 - 336 с.
2. Кечиев Л. Н., Пожидаяев Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества; Москва, 2005 - 352 с.
3. Воршевский А.А., Гальперин В.Е. Электромагнитная совместимость судовых технических средств; СПбГМТУ. – СПб., 2010 - 317 с.
4. Gieser, H. A. ESD testing : HBM to very fast TLP, H. A. Gieser. Tutorial presented at the ISREF .2004. p. 3-10.
5. Kai Wang, David Pommerenke, Ramachandran Chundru, Tom Van Doren, James L. Drewniak, Ashwin Shashindranath. Numerical Modeling of Electrostatic Discharge Generators. IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, vol. 45, No. 2, MAY 2003, p. 258-271.

#### References

1. Gurevich V.I. Mikroprocessornye rele zashchity. Ustroystvo, problemy, perspektivy. – M.: Infra-Inzheneriya, 2011 - 336 s.
2. Kechiev L. N., Pozhidaev E.D. Zashchita elektronnyh sredstv ot vozdeystviya staticheskogo elektrichestva; Moskva, 2005 – 352 s.
3. Worshevsky A.A., Gal'perin V.E. Elektromagnitnaya sovmestimost' sudovyh tekhnicheskikh sredstv; SPBGMTU. – SPb., 2010 - 317 s.
4. Gieser, H. A. ESD testing : HBM to very fast TLP, H. A. Gieser. Tutorial presented at the ISREF. 2004. p. 3-10.
5. Kai Wang, David Pommerenke, Ramachandran Chundru, Tom Van Doren, James L. Drewniak, Ashwin Shashindranath. Numerical Modeling of Electrostatic Discharge Generators. IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, vol. 45, No. 2, MAY 2003, p. 258-271

УДК 62-503.57

## АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ С ЭЛЕМЕНТАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ТЕПЛООБМЕННЫМИ АППАРАТАМИ

**Игорь Иванович Туркин**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры судовой автоматики и измерений  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
e-mail: iitg@yandex.ru

**Валерий Викторович Медведев**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

### Аннотация

В статье представлены результаты разработки нового подхода к совершенствованию систем управления теплообменными аппаратами (ТА). Рассмотрены особенности ТА как объектов автоматизации. Выполнен анализ основных существующих систем управления ТА, основанных на применении традиционного каскадного регулирования, а также их потенциальных возможностей. При исследовании проблемы использовались принципы системного подхода, в частности, методы анализа физики тепловых процессов, способы их регулирования, основанные на использовании результатов классической и современной теории управления, методы и алгоритмы оценивания и идентификации динамических систем, методы и алгоритмы искусственного интеллекта на основе принципа самоорганизации. Для повышения эффективности автоматизации ТА предложена методология создания систем управления с элементами искусственного интеллекта на основе принципа самоорганизации. Рассмотренные системы в полной мере учитывают особенности ТА как нестационарных нелинейных объектов и отвечают современным требованиям, предъявляемым к их автоматизации.

**Ключевые слова:** теплообменные аппараты, коэффициент теплопередачи, запаздывание, каскадное регулирование, самоорганизующийся регулятор с экстраполяцией.

## ADAPTIVE CONTROL WITH ELEMENTS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR HEAT EXCHANGERS

**Igor I. Turkin**

Dr.Sci.Tech, professor  
Professor, Department of Ship Automation and Measurements  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: iitg@yandex.ru

**Valery V. Medvedev**

Dr.Sci.Tech, Associate Professor,  
Professor, Department of Marine Internal Combustion Engines and Diesel Plants  
St. Petersburg State Marine Technical University  
190121, St.Petersburg, Lotsmanskaya, 3  
e-mail: v\_v\_medvedev@mail.ru

### Abstract

The article presents the results of the development of a new approach to the improvement of heat exchanger control systems (HE). The features of HE as automation objects are reviewed. The analysis of the main existing control systems for HE, based on the use of traditional cascade control, as well as their potential has been carried out. The principles of the systems approach were used in studying the problem, in particular, methods for analyzing the physics of thermal processes, methods for their control based on the use of the results of classical and modern control theory, methods and algorithms for evaluating and identifying dynamic systems, methods and algorithms of artificial intelligence based on the principle of self-organization. To improve the efficiency of HE automation, a methodology for creating control systems with elements of artificial intelligence based on the principle of self-organization has been proposed. The reviewed systems fully take into account the features of HE as non-stationary nonlinear objects and meet modern requirements for their automation.

**Keywords:** heat exchangers, heat transfer coefficient, delay, cascade control, self-organizing controller with extrapolation.

## Введение

Современный этап развития науки и техники характеризуется интеграцией результатов работы различных школ и направлений. На этой основе создаётся принципиально новая техника, отличающаяся чрезвычайной сложностью, расширением круга решаемых задач и диапазоном эксплуатационного использования.

Теплообменные аппараты (ТА) как объекты управления относятся к классу сложных нестационарных объектов с нелинейными характеристиками различного вида, так как во время эксплуатации практически все элементы привода подвергаются внешним возмущающим воздействиям. При этом диапазоны изменения ряда параметров достигают больших значений.

Методы разработки систем управления сложными объектами в значительной степени определяются особенностями протекающих в них физических процессов. Ярким примером такого положения применительно к ТА являются метод каскадного регулирования, основанный на классической теории автоматического управления.

В связи с этим в большинстве своём при автоматизации ТА, как нестационарных объектов, используются системы каскадного управления с постоянной настройкой, что снижает качество регулирования особенно в динамических режимах.

С ростом степени интеграции в микропроцессорной технике и переход от микропроцессоров к микроконтроллерам с встроенным набором специализированных периферийных устройств сделали необратимой тенденцию массовой замены аналоговых систем управления приводами на системы прямого цифрового управления.

Новый этап развития науки об управлении сложными объектами, к которым относится ТА, будет проходить успешно при одновременном развитии алгоритмического и программного обеспечения, элементной базы, аппаратных средств, измерительных комплексов. Основные затраты при разработке систем управления современными ТА приходится не на создание аппаратной части контроллера, а на разработку алгоритмического и программного обеспечения с новыми возможностями.

В последние годы появились новые фундаментальные направления в современной теории и технике управления, направленные на создание автоматизированных объектов нового поколения. Их развитие может приобрести важное практическое значение. К таким направлениям можно отнести физическую теорию управления, синергетический подход к проблемам управления, оптимизацию систем с прогнозируемой моделью, теорию нечетких и нейросетевых систем управления, методы искусственного интеллекта, и др. Именно развитию и применению методов искусственного интеллекта для совершенствования систем управления ТА с учётом их особенностей посвящена работа.

### 1. Описание объекта исследования

**Целью исследования** является разработка подхода к совершенствованию

систем управления ТА на основе применения элементов искусственного интеллекта.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**.

1. Выполнить анализ ТА как объекта управления для обоснования выбора методов автоматизации.

2. Рассмотреть особенности существующих систем управления ТА и их потенциальные возможности.

3. Обосновать целесообразность применения для автоматизации ТА системы с элементами искусственного интеллекта.

4. Предложить методологию создания систем управления ТА с элементами искусственного интеллекта.

**Научная новизна** исследования.

1. Предложен и обоснован подход к построению систем управления ТА с элементами искусственного интеллекта на основе принципа самоорганизации.

2. Обоснована целесообразность применения для автоматизации ТА системы с элементами искусственного интеллекта.

3. Предложена методология создания систем управления ТА с элементами искусственного интеллекта.

4. Показаны преимущества разработанных систем управления.

**Методы исследования.** При исследовании проблемы использовались принципы системного подхода, в частности, методы анализа физики тепловых процессов, способы их регулирования, основанные на использовании результатов классической и современной теории управления, методы и алгоритмы оценивания и идентификации динамических систем, методы и алгоритмы искусственного интеллекта на основе принципа самоорганизации.

**Анализ ТА как объекта управления** для обоснования выбора методов автоматизации. Известно, что ТА классифицируются по виду теплообменной поверхности (с поверхностью из трубок, с плоской поверхностью, с поверхностью непосредственного контакта теплоносителей); по физическому процессу, происходящему с основным технологическим веществом (нагреватели, холодильники, испарители, конденсаторы); по характеру работы во времени (рекуперативные, регенеративные и т. д.) и другим признакам.

Распространенной конструкцией теплообменной аппаратуры трубчатого типа является кожухотрубный теплообменник. Кожухотрубные теплообменники делят на теплообменники с неизменяемым агрегатным состоянием веществ, например, теплообменники типа газ-газ, газ-жидкость, жидкость-жидкость, а также теплообменники с изменяющимся агрегатным состоянием веществ (например, паро-газовые, паро-жидкостные теплообменники, испарители, конденсаторы).

Независимо от принципа действия теплообменные аппараты, применяющиеся в различных областях техники, как правило, имеют свои специфические названия. Эти названия определяются технологическим назначением и конструктивными особенностями.

Однако с теплотехнической точки зрения все аппараты имеют одно назначение – передачу

теплоты от одного теплоносителя к другому или между поверхностью твердого тела и движущимся теплоносителем, что определяет те общие положения, которые лежат в основе теплового расчета любого ТА.

В связи с этим особенности ТА как объекта автоматизации рассмотрим на примере кожухотрубного теплообменника.

Кожухотрубные теплообменники представляют собой аппараты, выполненные из пучков труб, собранных при помощи трубных решеток, и ограниченные кожухами и крышками со штуцерами. Трубное и межтрубное пространства в аппарате разобщены: два текучих теплоносителя (капельные жидкости, газы, пары или их смеси) обмениваются теплотой через цилиндрические поверхности металлических труб. Один из теплоносителей проходит внутри труб (по трубному пространству), а второй – по межтрубному пространству между наружной поверхностью всех труб и внутренней поверхностью кожуха, рис.1.

Кожухотрубные теплообменники выполняются одноходовыми (жидкость движется параллельно по всем трубкам) и многоходовыми (пучок труб разделен на несколько секций, по которым последовательно протекает нагреваемая среда, этим достигается повышение скорости среды и эффективность теплопередачи).

В частности, кожухотрубные теплообменники-подогреватели используются для нагрева потока, протекающего по трубному пространству. В качестве греющего агента наиболее часто используют водяной пар. Использование водяного пара позволяет получить высокий КПД, точное регулирование температуры нагреваемой среды, но температура нагрева ограничена 180°C.

Рассмотрим основные особенности физических процессов теплопередачи и запаздывания **Теплопередача.** В тепловых процессах теплоносители, участвующие в передаче теплоты, часто разделены перегородкой (стенкой аппарата, стенкой трубы и т.п.). Процесс теплопередачи включает перенос теплоты от ядра потока первого теплоносителя к стенке (теплоотдача), через стенку (теплопроводность) и от стенки к ядру потока второго теплоносителя (теплоотдача). Количество передаваемой теплоты при этом определяется основным уравнением теплопередачи [1].

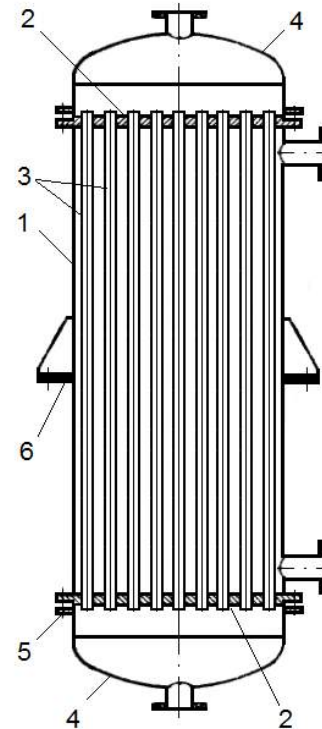


Рис.1. Кожухотрубный теплообменник: 1 – кожух; 2 – трубная решетка; 3 – трубки; 4 – сферическое днище; 5 – фланец; 6 – лапа

Всего существует три простых (элементарных) механизма передачи тепла – теплопроводность, конвекция, тепловое излучение, а также различные виды сложного переноса тепла, которые являются сочетанием элементарных видов. Основные из них: теплоотдача (конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью твердого тела); теплопередача (теплообмен от горячей среды [жидкость, газ или твердое тело] к холодной через разделяющую их стенку); конвективно-лучистый перенос тепла (совместный перенос тепла излучением и конвекцией); термомангнитная конвекция. Разработаны различные методы расчета тепловых процессов, в том числе коэффициента теплопередачи, но только в стационарных (статических режимах). В динамических режимах значения коэффициента характеризуются информационной неопределенностью в связи с зависимостью его от ряда факторов (давления, температуры, состава, агрегатного состояния веществ и др.), что приводит к допущениям при оценке результатов расчетов.

**Запаздывание** – ёмкость или сопротивление, которые замедляют изменения переменной. Другая особенность процесса нагрева потока заключается в том, что корпус теплообменника имеет большой объём и содержит много воды. Большое количество воды обладает ёмкостью, позволяющей сохранять большое количество теплоты. Это означает, что, если температура воды на входе в теплообменник изменится, эти изменения проявятся на выходе теплообменника с большим запаздыванием. Это первая причина запаздывания. Наряду с этим существует вторая причина – паровые трубы оказывают сопротивление передаче теплоты от пара внутри труб к воде снаружи труб. Это означает, что

будет иметься запаздывание между изменениями в паровом потоке и соответствующими изменениями температуры воды. Значение запаздывания также является неопределённой величиной, причём как в статических, так и динамических режимах. Следовательно, Фактически ТА, как объект управления, являются нестационарными нелинейными объектами с указанными информационными неопределённостями. В результате, адаптивная настройка систем управления с пропорционально-интегрально-дифференцирующими (ПИД) регуляторами осуществляется в условиях информационной неопределённости!

**2. Задачи регулирования, каскадные схемы регуляторов**

Для повышения качества регулирования ТА как объектов с запаздыванием, которое принимается постоянным, используют как автономные одноконтурные, так и более сложные каскадные системы автоматического регулирования (САР). Каскадное регулирование – это регулирование, в

котором два или больше контуров регулирования соединены так, чтобы выход одного регулятора корректировал уставку другого регулятора. В кожухотрубных паро-жидкостных теплообменниках, предназначенных для нагревания жидкости до заданной температуры за счет теплоты конденсации греющего пара, основной задачей регулирования является стабилизация температуры жидкости на выходе из теплообменника. Существуют следующие варианты применения каскадного регулирования промышленных кожухотрубных паро-жидкостных теплообменников, рис.2 [2, 3].

**Первый вариант** (рис.2,а). Для регулирования выходной температуры жидкости без статической ошибки можно применить одноконтурную замкнутую САР с использованием ПИ-регулятора или ПИД-регулятора, изменяющего расход греющего пара. Недостатки такого регулирования: при сильных возмущающих воздействиях по каналам расхода или температуры жидкости на входе в теплообменник качество переходного процесса оказывается неудовлетворительным.

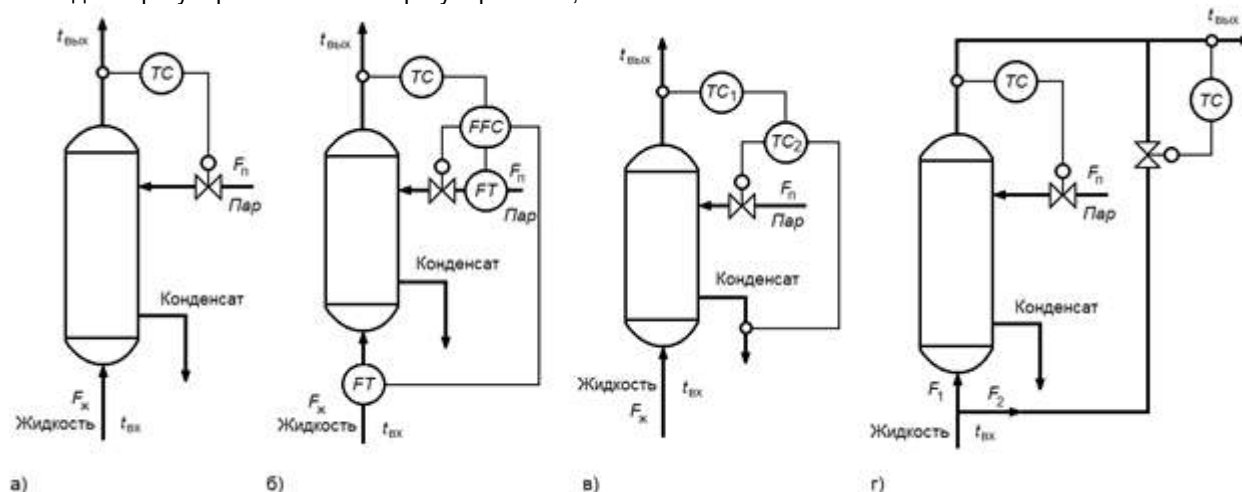


Рис.2. Варианты систем каскадного регулирования кожухотрубных паро-жидкостных теплообменников

**Второй вариант** (рис.2,б). Если имеют место возмущающие воздействия по каналам расхода  $F_{ж}$  или температуре жидкости на входе  $t_{вх}$ , то ограничиваются их статической компенсацией. Реализовать такой подход возможно применением каскадной САР с ПИД-регуляторами соотношения расходов пара и жидкости  $F_{п}/F_{ж}$  с коррекцией по третьему параметру – температуре жидкости на выходе  $t_{вых}$  теплообменника.

**Третий вариант** (рис.2,в). При сильных возмущающих воздействиях по каналам изменения давления или температуры греющего пара возможно применить каскадную систему регулирования температуры (или давления) с ПИД-регуляторами в межтрубном пространстве теплообменника с коррекцией задания по  $t_{вых}$ . Температура (или давление) в межтрубном пространстве теплообменника – промежуточная координата, значительно быстрее реагирующая на указанные возмущающие воздействия, чем температура жидкости на выходе теплообменника  $t_{вых}$ .

**Четвёртый вариант**, (рис.2,г). Чтобы обеспечить высокое качество регулирования

температуры, желательно иметь дополнительное управляющее воздействие. Для этого жидкость, поступающую на нагревание, перед теплообменником делят на два потока  $F_1$  и  $F_2$ . Часть жидкости (поток  $F_1$ ) направляют в теплообменник и нагревают до температуры несколько выше заданной. Другая часть жидкости (поток  $F_2$ ) минует теплообменник, оставаясь холодной. За теплообменником нагретый и холодный потоки смешиваются для получения жидкости заданной температуры. Таким образом, реализуется схема с байпасированием (см. рис.2,г). Обычно применяют следующие типы каскадных систем: П-ПИ, ПИ-ПИ, ПИ-ПИД (первый регулятор является стабилизирующим, а второй – корректирующим).

Как следует из приведённых схем, несмотря на приведённые особенности и их информационные неопределённости, в большинстве своём при автоматизации ТА используются системы управления с постоянной настройкой на основе линеаризованных упрощённых математических моделей (ММ) ТА и методов классической теории управления. Разработка ММ ТА требуемого уровня

адекватности, с учётом проблем с информационной неопределённостью процессов теплопередачи и запаздывания, их идентификация и сертификация (верификация) связана с очень высокими интеллектуальными и материальными затратами [4, 5, 6]. Поэтому традиционные направления даже в адаптивном управлении не могут решить проблему для многих их типов областей и условий применения, когда даже структура ММ априори неизвестна. Вследствие этого современная практика нуждается не только в алгоритмах адаптивного каскадного систем управления, но и в современных адаптивных оптимальных алгоритмах автоматического управления и обработки информации [7].

Настало, вероятно, время реализации нового подхода к автоматизации ТА в связи появлением перспективного класса адаптивных систем, так как, с одной стороны, ужесточились требования к современным системам управления как с точки зрения качества и точности регулирования на всех режимах работы объекта, так и круга решаемых задач. С другой стороны, появились новые возможности их обеспечения – разработаны методы современной прикладной теории управления и новая элементная база (программируемые контроллеры и одноплатные компьютеры) [8].

Из всех известных методов синтеза таких адаптивных управлений, наиболее эффективными в практическом применении к сложным нелинейным

нестационарным объектам, включая ТА, является концепция систем с высоким уровнем искусственного интеллекта на основе принципа самоорганизации акад. Красовского А.А. [9].

### 3. Элементы искусственного интеллекта на основе принципа самоорганизации и их применение

Такие системы основаны на использовании совокупности методов современной теории управления – методов оценивания, идентификации, оптимального управления по критерию обобщённой работы, совмещённого управления и др., а также предложенного акад. Красовским А.А. метода реализации принципа самоорганизации алгоритмов управления.

Принципиальное отличие этих систем управления от известных адаптивных систем состоит в том, что они построены на сочетании алгоритмов структурной (функциональной) адаптации с алгоритмами параметрической адаптации и оптимальностью. Системы с самоорганизующимися алгоритмами отличаются от традиционных, которые, как правило, содержат только измерительные устройства и блок управления, наличием дополнительных блоков оптимального оценивания и идентификации, рис.3 [10, 11].



Рис.3. Структурная схема универсальной системы автоматического управления

Принятые на рис.3 обозначения:  $X$  – внутренние переменные состояния объекта управления;  $Z$  – контролируемые переменные состояния объекта управления;  $U$  – управление; индексы о, ш, а, м – соответственно «оптимальное управление», «оптимальное управление в штатном режиме», «оптимальное управление в аварийном режиме», «переменные модели».

Оптимальное управление возможно лишь при оптимальной обработке информации. Эти функции - оптимальное оценивание состояния и идентификацию параметров и характеристик объекта управления по экспериментальным данным реализуют указанные блоки. Оценивание состояний - это определение текущих значений таких

переменных процесса, которые не могут быть измерены непосредственно или могут быть измерены лишь с большими помехами. Алгоритмы идентификации позволяют определять структуру модели ТА и восстанавливать параметры этой модели в процессе функционирования.

Рассматриваемые варианты оптимальных самоорганизующихся систем по принципу действия относятся к дискретным системам, поэтому процесс управления разбивается на циклы, которые в свою очередь – на шаги. Важным отличием принципа действия системы является формирование нового закона управления на каждом цикле, а не принятого постоянного как в традиционных системах. Этот подход позволяет учитывать все изменения в

состоянии ТА, включая действие на него уже конкретных значений коэффициента теплопередачи и запаздывания.

**Принцип действия и применение.** В отличие от каскадного регулирования ТА (см. рис.2,б, 2,в и 2,г), при котором используются два регулируемых параметра, в предлагаемых системах используется один параметр – выходная температура жидкости. Входной величиной системы регулирования является сигнал рассогласования между задающим воздействием и выходной величиной ТА, рис.4. Сигнал рассогласования с помощью алгоритмов оценивания на основе фильтров Калмана

обрабатывается на каждом цикле. В блоке оптимальной идентификации по выбранному показателю, измеряемому и вычисляемому в ходе самого процесса управления, связанного с качеством, точностью регулирования на каждом цикле или на протяжении ряда циклов, осуществляется автоматический выбор порядка модели оцениваемого процесса. Исполнительная часть оптимальной системы имеет алгоритм, синтезированный на основе интегрального квадратичного критерия с учётом выбранного порядка модели. В течение цикла положение органа управления остаётся неизменным.

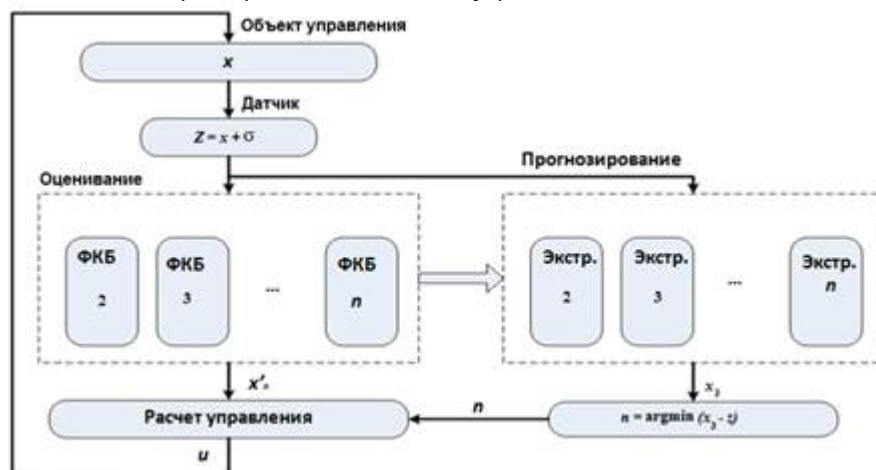


Рис.4. Структурная схема самоорганизующегося регулятора с высоким уровнем искусственного интеллекта

На рис. 4 обозначены: ФКБ – блок фильтров Калмана-Бьюси; Экстр. – блок экстраполяции;  $n = \text{argmin}(x, -z)$  – блок определения порядка модели;  $x$  – координаты объекта управления;  $z$  – сигнал с датчика;  $u$  – сигнал управления.

Самоорганизация системы регулирования ТА, следовательно, осуществляется с помощью взаимосвязанных принятых алгоритмов оценки состояния системы, фильтрации входной информации, структурной и параметрической адаптации автоматически формируемой модели ТА, и, наконец, автоматически определяемых оптимальных управляющих воздействий на каждом цикле, а не на этапе проектирования. Учитывая приведённую организацию управления, такую

систему при автоматизации ТА следует считать «системой регулирования с элементами искусственного интеллекта». Применение этих систем к различным сложным объектам показало их эффективность и перспективность [12, 13].

**Заключение**

Применение технологии активного управления ТА открывает перед проектировщиками большие возможности для успешного выполнения сложных технических заданий на их проектирование. Таким образом, рассмотренные системы в полной мере учитывают особенности ТА как нестационарных нелинейных объектов и отвечают современным требованиям, предъявляемым к их автоматизации.

**Литература**

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учеб. для вузов. – изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 415 с.
2. Каскадное регулирование. <http://www.kipiavp.ru/info/kaskadnoe-regulirovanie.html>. (30.01.2019).
3. Регулирование кожухотрубных теплообменников [https://studopedia.ru/7\\_129015\\_lektsiya--regulirovanie-kozhuhotrubnih-teploobmennikov.html](https://studopedia.ru/7_129015_lektsiya--regulirovanie-kozhuhotrubnih-teploobmennikov.html). (30.01.2019).
4. Солдатов В.В., Ухаров П.Е. Адаптивная настройка систем управления с ПИД регуляторами в условиях информационной неопределенности // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – №8. – С.16-20.
5. Штейнберг Ш.Е., Залуцкий И.Е., Серезин Л.П., Варламов И.Г. Настройка и адаптация автоматических регуляторов. Инструментальный комплект программ // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2003. – №10. – С.43-47.
6. Скороспешкин М.В. Адаптивные псевдолинейные корректирующие устройства систем автоматического управления: диссертация ... кандидата технических наук: [Место защиты: Том. политехн. ун-т]. – Томск, 2009. – 252 с.
7. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.



8. Новые концепции общей теории управления / Сб. науч. тр. / Под ред. А.А. Красовского. – М.-Таганрог: ТРТУ, 1995. – 183 с.
9. Красовский А.А. Адаптивный оптимальный регулятор с переменными порядком наблюдателя и временем экстраполяции // Автоматика и телемеханика. – 1994. – №11. – С.97-112.
10. Красовский А.А., Наумов А.И. Аналитическая теория самоорганизующихся систем управления с высоким уровнем искусственного интеллекта // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2001. – №1. – С.69-75.
11. Красовский А.А. Избранные труды. Самые ранние. Самые новые. – М.: Наука, 2003. – 614 с.
12. Туркин И.И., Мин Хейн. Самоорганизующиеся системы управления морскими сложными объектами с высоким уровнем искусственного интеллекта // Материалы XIV Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная информатика-РИ-2014», Санкт-Петербург, 29-31 октября 2014 года. СПб.: ООО «К-8», 2014. – С.477-478.
13. Туркин И.И., Мин Хейн. Особенности применения самоорганизующегося регулятора при управлении сложными морскими объектами // Материалы четвертой Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции «Актуальные проблемы морской энергетики». Посвящается 125-летию профессора, д.т.н., заслуженного деятеля науки и техники В.А. Ваншейдта. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ. 2015. – С.184-186.

#### References

1. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha: ucheb. dlya vtuzov. izd. 4-ye, pererab. i dop. M.: Energoizdat, 1981. – 415 s. (In Russian)
2. Kaskadnoye regulirovaniye. <http://www.kipiavp.ru/info/kaskadnoe-regulirovanie.html>. (30.01.2019) (In Russian)
3. Regulirovaniye kozhukhotrubnykh teploobmennikov [https://studopedia.ru/7\\_129015\\_leksiya--regulirovanie-kozhuhotrubnih-teploobmennikov.html](https://studopedia.ru/7_129015_leksiya--regulirovanie-kozhuhotrubnih-teploobmennikov.html). (30.01.2019). (In Russian)
4. Soldatov V.V., Ukharov P.Ye. Adaptivnaya nastroyka sistem upravleniya s PID regulyatorami v usloviyakh informatsionnoy neopredelennosti. Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika. 2004. N8. S.16-20. (In Russian)
5. Shteynberg SH.Ye., Zalutskiy I.Ye., Serezhin L.P., Varlamov I.G. Nastroyka i adaptatsiya avtomaticheskikh regulyatorov. Instrumental'nyy komplekt program. Promyshlennyye ASU i kontrolyery. 2003. N10. S.43-47. (In Russian)
6. Skorospeshkin M.V. Adaptivnyye psevdolineynyye korrektruyushchiye ustroystva sistem avtomaticheskogo upravleniya: dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk: Tom. politekhn. un-t. Tomsk, 2009. 252 s. (In Russian)
7. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya. Pod red. A.A. Krasovskogo. M.: Nauka, 1987. 712 s. (In Russian)
8. Novyye kontseptsii obshchey teorii upravleniya. Sb. nauch. tr. Pod red. A.A. Krasovskogo. M.-Taganrog: TRTU, 1995. 183 s. (In Russian)
9. Krasovskiy A.A. Adaptivnyy optimal'nyy regulyator s peremennymi poryadkom nablyudatelya i vremenem ekstrapolyatsii. Avtomatika i telemekhanika. 1994. N11. S.97-112. (In Russian)
10. Krasovskiy A.A., Naumov A.I. Analiticheskaya teoriya samoorganizuyushchikhsya sistem upravleniya s vysokim urovnem iskusstvennogo intellekta. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya. 2001. N1. S.69-75. (In Russian)
11. Krasovskiy A.A. Izbrannyye trudy. Samyye ranniye. Samyye novyye. M.: Nauka. 2003. 614 s. (In Russian)
12. Turkin I.I., Min Khein. Samoorganizuyushchiyesya sistemy upravleniya morskimi slozhnymi ob'yektami s vysokim urovnem iskusstvennogo intellekta. Materialy KHIV Sankt-Peterburgskoy mezhdunarodnoy konferentsii «Regional'naya informatika-RI-2014», Sankt-Peterburg, 29-31 oktyabrya 2014 goda. SPb.: ООО «К-8», 2014, S.477-478. (In Russian)
13. Turkin I.I., Min Khein. Osobennosti primeneniya samoorganizuyushchegosya regulyatora pri upravlenii slozhnymi morskimi ob'yektami. Materialy chetvertoy Vserossiyskoy mezhotraslevoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nyye problemy morskoy energetiki». Posvyashchayetsya 125-letiyu professora, d.t.n., zasluzhennogo deyatelya nauki i tekhniki V.A. Vansheydta. SPb.: Izd-vo SPbGM-TU. 2015. S.184-186. (In Russian)

**УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

УДК 316.477

**СОЦИОЛОГИЧЕСКАЯ СЛУЖБА УНИВЕРСИТЕТА КАК ИНСТРУМЕНТ  
УПРАВЛЕНИЯ В СУДОСТРОИТЕЛЬНОМ ОБРАЗОВАНИИ****Оксана Владимировна Голованова**

кандидат философских наук, доцент кафедры философии и социологии  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: tibidabo@yandex.ru

**Александр Васильевич Солдатов**

доктор философских наук, профессор, заведующий кафедрой философии и социологии  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: soldatov2012@yandex.ru

**Андрей Александрович Солдатов**

кандидат социологических наук, доцент кафедры философии и социологии  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: soldatov@smtu.ru

**Аннотация**

Статья посвящена исследованию социальных инструментов управления высшим образованием в судостроительной сфере. В качестве эмпирического материала в работе используются данные, полученные студентами научного кружка «Социолог» кафедры философии и социологии СПбГМТУ в ходе социологических опросов, проводимых в 2017-2018 гг. Программа рекомендуемых управленческих решений основывается на выводе о том, что в любом судостроительном вузе необходимо экстраполировать удачные инновации на деятельность всех других структурных подразделений, поскольку в эпоху нематериальной экономики, экономический успех становится производным от социального капитала тех профессиональных организаций, в том числе и вузов, которые усиливают свои внутренние и внешние коммуникации. А сделать это возможно только при активизации деятельности всех работников и, в первую очередь, обучающихся. Важную роль в этом процессе должны играть социологические службы, которые проводят постоянный мониторинг сложившейся ситуации, способствуя формированию интерактивной коммуникативной среды в вузе, повышению уровня сопричастности к управлению работников и обучающихся как важных условий увеличения конкурентоспособности отечественного судостроительного образования.

**Ключевые слова:** социология управления, судостроительное образование, социологический опрос, социологическая служба, референтный образ студента, научно-исследовательская работа студентов, личностное знание, интерактивная среда университета.

**SOCIOLOGICAL SERVICE AS THE INSTRUMENT OF MANAGEMENT IN THE  
SHIPBUILDING EDUCATION****Oksana V. Golovanova**

Ph. D., an assistant of professor of department of philosophy and sociology  
State Marine Technical University of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya,3, Saint-Petersburg, 190008, Russian Federation,  
e-mail: tibidabo@yandex.ru

**Aleksandr V. Soldatov**

Dr. Sci., professor, the head of the department of philosophy and sociology  
State Marine Technical University of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya,3, Saint-Petersburg, 190008, Russian Federation,  
e-mail: soldatov2012@yandex.ru

**Andrei A. Soldatov**

Ph., D., an assistant of professor of department philosophy and sociology  
State Marine Technical University of Saint-Petersburg  
Lotsmanskaya,3, Saint-Petersburg, 190008, Russian Federation,  
e-mail: soldatov@smtu.ru

**Abstract**

The article is devoted to the research of social instruments of Higher education management in shipbuilding sphere. As the empirical material the article analyses the data obtained by the students of

St. Petersburg State Marine Technical University in the course of sociological research carried out in 2017-2018 in the scientific circle Sociology at the department of philosophy and sociology. The program of the recommended management decisions is based on the conclusion that in any shipbuilding Higher school it is necessary to extrapolate the successful innovations in the activity of all structural subdivisions. As long as in the era of the intangible economy, economic success becomes derived from the social capital of those professional organizations, including universities, which strengthen their internal and external communications. This is possible only with the activation activity of all teachers and learners. In this process the sociological service must play an important role monitoring the situation, contributing to the formation of an interactive communicative environment at the university, increasing the level of involvement in the management of workers and students as important conditions for increasing the competitiveness of domestic shipbuilding education.

**Key words:** sociology of management, shipbuilding education, sociological questionnaire, sociological service, student reference image, student scientific research, personal knowledge, university interactive environment.

Современный мир претерпевает качественные структурные изменения не только в технической сфере, но и в социальной. Эти социальные трансформации подчиняются сложным законам и осуществляются в контексте неопределенности и риска. Поэтому стратегии развития социальных сообществ различного уровня прокладываются методом проб и ошибок. Особая нагрузка ложится на профессиональные организации, выживание которых напрямую зависит от экспоненциально растущей экономической прибыли и социального рейтинга, сетевой включенности в различные сегменты социокультурного поля. В век нематериальной экономики, экономический успех становится производным от социального капитала профессиональных организаций, от степени интенсивности внешних коммуникаций (социально-политических и социально-экономических) и внутренних коммуникаций, обеспечиваемых с помощью так называемого организационного обучения, т. е. целенаправленного продуцирования и распространения структурной новизны. В обучающейся организации новизна, как правило, приветствуется, вознаграждается, распространяется, становится социальным капиталом, или элементом коллективного знания. В такой организации возникает голографический эффект: удачная инновация благодаря организационному обучению экстраполируется на деятельность всех других частей, преимущества системного целого становятся преимуществом каждой части, часть и целое обретают свойства самоподобия. Это обуславливает синергию, энергетический скачок, взаимоусиление и, как следствие, организация осуществляет новые прорывы, возникают новые вертикальные и горизонтальные связи, новые источники финансирования, привлекаются дополнительные кадровые ресурсы. Без организационного обучения блокируется именно размножение инноваций, они не становятся общим структурным преимуществом. Возникая в руководящем сегменте, они там же и локализируются, содержательно не обогащая функционирование остальных структурных единиц, не подтягивая их до своего уровня организационной деятельности. Это ведет к маргинализации периферии в организации. Инициатива зависимых звеньев не предполагается, а, возникнув, не имеет шансов на реализацию. Различие между теми, кто может влиять на жизненные стратегии организации, и теми, чьи творческие потребности редуцируются,

начинает расти, вызывая в конечном счете бюрократический синдром.

Объективный анализ структурных форм современных профессиональных организаций не оставляет места для положительных оценок доминирующих общемировых тенденций, явно диссонирующих с общеэволюционными стратегиями. Политические и экономические факторы деформируют эволюционные и цивилизационные стратегии в сторону инволюции, вызывая всевозможные кризисы. В 2016 году о тупиковой экономической и гражданской ситуации, вызванной ростом неравенства и его социально-психологическими следствиями, заявил Ангус Дитон, лауреат Нобелевской премии по экономике 2015 года. По его мнению, рост экономического неравенства вызывает к жизни условия для монопольного распоряжения преимуществами, прежде всего связанными с обладанием научными технологиями, и дальнейшими усилиями распорядителей этих технологий по сохранению своих монопольных позиций, для чего блокируются возможности развития любых других технологических возможностей. Такие социальные мотивы, которые А. Дитон называет «поведением в поисках ренты» [3, с. 33], вступают в противоречие с организационными условиями развития общества. Среди них и демократия как условие, обеспечивающее рост творческих усилий и необходимого многообразия.

Мы полагаем, что университетская среда, от имени которой мы сегодня выступаем, обязана обеспечить реализацию озвученных рациональных аргументов, которые обретают на современном этапе статус морального императива, инкорпорировать эти экспертные позиции в дисциплинарно-образовательные академические практики, воспитать «волонтеров» от рационально-этических практик не только в профессорско-преподавательской, но и, что особенно важно, студенческой среде. Мы видим прогрессивный путь развития университетов, и особенно технических, напрямую причастных к созданию материального тела цивилизации, в активации творческого потенциала не только молодых ученых, но и самих обучающихся. Теоретическим основанием для данного тезиса является ставшее уже постулативным положение исторической антропологии об особой ступени современной, так называемой префигуративной культуры, дифференцирующим признаком которой является новый способ передачи знания. Если в

предшествующие периоды знание передавалось от старших к младшим, а затем еще добавился вектор «от младших - к младшим», то во второй половине XX века возникает еще и вектор «от младших — к старшим». И этот вектор к настоящему времени только усилился, особенно в сфере компьютерных технологий и на фоне инновационного характера современной культуры. Этот процесс происходит спонтанно, но им можно управлять, оптимизируя долю этого вектора в общих когнитивных приобретениях научно-образовательных сообществ.

Ниже пойдет речь о некоторых предлагаемых нами управленческих вмешательствах в сложившиеся учебные и воспитательные университетские традиции. Программа этих интервенций сформировалась в ходе пилотажных социологических исследований, проводимых в течение 2017-2018 гг. на базе кафедры философии и социологии и студенческого научного кружка СНО «Социолог» в Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете. Эти исследования продолжили темы предыдущих, проводимых с 2014 года и направленных на изучение с помощью социологических методов различных социальных аспектов жизни университета. Результаты исследований неоднократно публиковались в научной печати. [1, 5] При выборе тем опросов мы опирались на обоснованное в современной науке положение о значимости социальных мотивов, во многом определяющих жизненные стратегии человека, особенно для того, чтобы они оформились как творческие и продуктивные. Поэтому в стимулирующей среде воспитательной работы должен быть утвержден принцип позитивной социальной идентичности, который подразумевает формирование у обучающихся высших социальных чувств по отношению к своему университету: гордость, патриотизм, солидарность, ответственность, творческий энтузиазм. На базе этих чувств формируется определенный тип привязанности, определяющий уровень эмоциональной безопасности личности. [4] К настоящему времени хорошо исследованными являются механизмы формирования этих типов в детстве по отношению к родителям или воспитателям, но можно предположить, что этот механизм продолжает действовать и в студенческие годы, когда и происходит «дозревание» личности. В этой фазе социализации и профессионализации «привязанности» возникают не в рядовых ситуациях трансляции знаний, а в ситуациях продуктивного творческого научного труда, когда личность открывает в себе новое продуктивное измерение. Как правило, введение в эти ситуации осуществляют научные руководители, имеющие большой опыт научной работы.

«Ученый» — это тоже социальная роль, но менее предписанная, предполагающая индивидуальный опыт общения с неопределенностью. И этот опыт обучающийся первоначально может обрести только в совместной работе с научным руководителем

посредством передачи так называемого не формализованного личного знания до тех пор, пока этот навык не станет самостоятельным. Воспитательное воздействие достигается за счет того, что при определенных, разделяемых с более компетентным человеком продуктивных интеллектуальных состояниях, возникают особые модусы сознания (философы называют их экзистенциалами творчества), которые становятся отчетливой доминантой у обучающегося, и в силу этого обретают селективный статус. Можно сказать, что поведение, требуемое научной деятельностью, является одновременно и результатом научно-педагогического воздействия преподавателя, и приемом самовоспитания студента. Понятно, что среди всех институтов социализации личности только университетская среда является единственной зоной первоначального научного творческого опыта личности.

Какова текущая ситуация с научно-исследовательской работой студентов в СПбГМТУ? Только 9,4% респондентов из 340 опрошенных студентов (опрос проводился в июне 2018 года по запросу администрации вуза на тему удовлетворенности обучающихся, в выборку вошли бакалавры и магистры четырех факультетов) охвачены научной работой. Данные приведены на рис. 1.

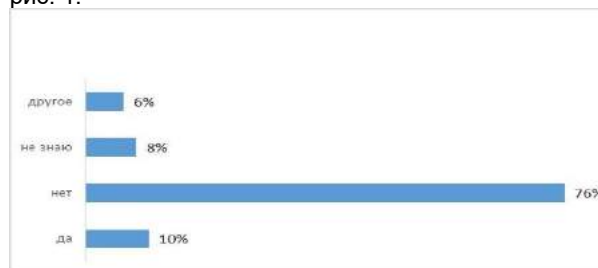


Рис 1. Вовлеченность обучающихся в СПбГМТУ в научно-исследовательскую работу

Около 8% — затруднились ответить на вопрос, скорее всего, потому, что у них не сформированы не только навыки, но и предварительные представления о научной работе. 76% ответили, что не занимаются научной работой, несмотря на то, что курсовые работы, являющиеся первой обязательной формой научной работы студентов, пишутся с первого курса. Студенты, по-видимому, не рассматривают эту деятельность как исследовательскую, что свидетельствует о формальном подходе со стороны научных руководителей. Внутри выборки показатели варьируются от факультета к факультету. Самым «онаученным» оказался факультет корабельной энергетики и автоматики (ФКЭиА): в научные исследования включено 15,7%, в работе научных конференций участвуют 25,62%. Самым «неблагополучным» оказался факультет кораблестроения и океанотехники (ФКО): 5,61% и 2,8% соответственно. В промежутке этого спектра находятся факультет морского приборостроения (ФМП) и экономический факультет (ЭФ). Данные приведены на рис. 2.

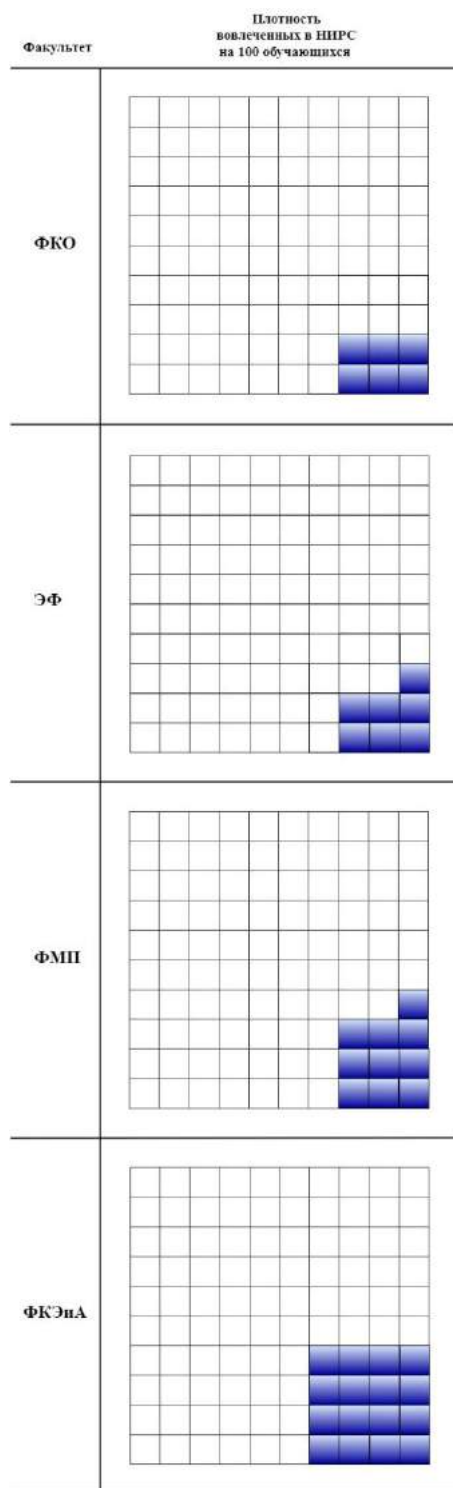


Рис. 2. Плотность вовлеченных в НИРС на 100 обучающихся

Увеличение числа занятых научной работой коррелируется с повышением оценки обучающимися качества образования по программе: на ФКЭиА оценили её на «отлично» 14,88%, на ФКО – 9,35%. У обучающихся на ФКЭиА большой процент тех, кто считает, что может влиять на повышение качества образовательных ресурсов 16,53% против 5,61% на ФКО.

Сложившаяся на сегодня система научной работы студентов (НИРС) выглядит следующим образом: предусмотренные учебными планами обязательные курсовые и выпускные аттестационные работы, научные исследования и публикации, осуществляемые в рамках научных кружков, грантов, плановые или случайные привлечения к участию в научных конференциях и публикациям в соответствии с планами воспитательной работы или по личной инициативе преподавателей. Преимущественный способ привлечения для всех этих форм, за небольшими исключениями, один и тот же, а именно «сверху – вниз», от администрации и преподавателей – к студентам. Мы предлагаем усложнить способ вовлечения, наделив правом инициативы самих студентов и создав для этого информационно-коммуникативные, финансово-экономические и организационно-правовые условия. Прежде всего, необходимо обеспечить открытый доступ к информации об имеющихся возможностях участия в конкурсах, грантах, стажировках, практиках, конференциях, научных сборниках и других научно-практических проектах и наделить студентов правом самому выбирать себе проект и научного руководителя для участия в нем. Следует также разработать систему финансового поощрения преподавателей, осуществляющих подобное руководство, в соответствии с градациями НИРС. Необходимо разработать «Положение о научно-исследовательской работе обучающихся в СПбГМТУ», а также создать прецедент иницируемой самими студентами НИРС и запустить его информационный образ в коммуникативную сеть вуза с целью постепенного включения в состав референтного образа студента как ролевого образца для индивидуального поведения. [1]

Научная работа студентов должна быть признана одним из приоритетных направлений деятельности в кораблестроительном университете. Можно проработать также идею о введении n-% квоты на обязательное участие обучающихся в реализации госзаказов на НИР или любых других грантов, выполняемых в вузе. Участие в грантах могло бы помимо своей основной играть и экономическую функцию: быть источником средств к существованию, избавляя студентов от необходимости участия в низко-интеллектуальных, не наукогенных, и не техногенных видах трудовой деятельности, которые, к сожалению, на сегодняшний день являются преобладающими в структуре трудовой занятости студентов. Введение квоты на обязательную долю студенческого участия в НИР выполняло бы также и профориентационную функцию, чрезвычайно значимую в текущей ситуации в кораблестроительной отрасли. Социологический опрос, проведенный среди бакалавров и магистров СПбГМТУ весной 2017 года (67 респондентов, обучающихся на старших курсах бакалавриата и магистраты) позволил нам выявить основное противоречие в мотивационной сфере обучающихся, совмещающих учебу и работу, а таких – подавляющее большинство. Студенты предпочитают более высокооплачиваемую работу вне зависимости от ее связи с получаемой специальностью. Студенческий труд охотно и продуктивно используется в сфере бизнеса и услуг, принося субъектам труда доход и социально-

коммуникативные, но не технологические навыки. Такая ситуация совершенно не приемлема в сфере высоких технологий, к которой принадлежит и СПбГМТУ. Профессия морского инженера требует длительного и целенаправленного взращивания, и экономическое бремя такого культивирования не должно всецело ложиться на плечи самих обучающихся, оно, по крайней мере, должно быть долевым, включая участие государства и университетов. По мнению опрошенных, проблема трудоустройства – это прежде всего проблема учебного заведения (66%), выпускников (24%), государства (10%). Сами студенты, попав в ситуацию антиномии краткосрочных целей (денежные средства сейчас, чтобы соответствовать потребительским стандартам) и долгосрочных (стать профессионалом, соответствующим международным стандартам наукоемких профессий), выбирают первое (63% и 22% соответственно). 64% респондентов отметили, что им недостаточно навыков и знаний, приобретаемых в университете, для трудоустройства.

Следующим направлением управленческих усилий могло бы стать привлечение студентов к управлению университетом. Творческую активность обучающихся можно было бы усилить посредством сопричастности к управлению, определению того, каким должен быть университет. Общеизвестно, что человек стремится определять то, что определяет его самого, это бытийный экзистенциал свободы. Современный студент и наделен, и требует большей степени свободы, обладает большей компетентностью о социальном мире, его возможностях и несовершенствах, всегда связанных с нарушением справедливости. Сталкиваясь с очевидно ассиметричной социальной ситуацией, он отчуждается от социального мира и ищет утешения не в мире общения с людьми, а в мире обладания вещами. Однако проведенный нами опрос студентов ФКО в марте 2017 (51 респондент) выявил неожиданно высокую степень понимания ими не только проблем, стоящих перед университетом, но и возможных способов их решения в сложившихся социально-экономических условиях. [2] Им предложено было написать эссе на тему: «Если бы я управлял Корабелкой». Респонденты пользовались только собственными языковыми ресурсами. Мы намеренно не предлагали им опросник с готовыми вариантами ответов, чтобы выявить степень владения «технарями» управленческой терминологией. Второй курс был определен в качестве валидной выборки, поскольку на втором курсе гипотетически ещё не ожидается высокая степень отчуждения от вуза. Оба предположения оказались верными: результаты подтвердили и организационную компетентность, и лояльность университету: несмотря на указанные проблемы, большинство студентов оценили степень удовлетворенности качеством образования в университете выше среднего, совокупный балл по всей выборке 84 из 100.

Также было решено сравнить приоритетные проблемы, обозначенные обучающимися и профессорско-преподавательским составом (опрос проводился в 2017 году, 189 респондентов). Среди наиболее важных задач управления преподаватели отметили: образовательная деятельность (88%),

заработная плата (71%), научная деятельность (57%), условия труда (39%), психологический климат (20%), международное сотрудничество (15%), молодежная политика (7%). Студенты же обозначили следующие проблемные сферы: организация учебного процесса (93%), обустройство кампуса (54%), модернизация технического оснащения аудиторий и лабораторий (49%), сотрудничество с предприятиями-индустриальными партнерами вуза и расширение практического обучения, включая наставничество со стороны работников предприятий (37%), организация НИРС (24%), спорт и физическая культура (20%). Сравнительный анализ позволяет определить смещение приоритетов профессорско-преподавательского состава в сторону эгоцентрических, индивидуальных интересов по сравнению с более корпоративно-центрированными интересами обучающихся в СПбГМТУ.

Значительная часть опрошенных студентов (40%) отметили желательность регулярного мониторинга удовлетворенности обучающихся посредством анкетирования, рассматривая его как инструмент посредничества между ними и администрацией. Среди наиболее инновационных предложений, сделанных отдельными студентами, были следующие: углубленное изучение профильных предметов, в том числе за счет ознакомления с историей дисциплины, и, прежде всего, математики; привлечение к преподаванию консультантов из IT-сферы; создание собственных алгоритмов и программ, повышение проходного балла при поступлении в вуз и отчисление хронических должников для повышения общего уровня студенческого контингента.

Перманентный мониторинг мнений, позиций, приоритетов, оценок, психологической атмосферы и социальных чувств обучающихся не только повысил бы уровень их партиципации как субъективного представления о своей роли в университете, но и позволил бы использовать их интеллектуальные ресурсы для более эффективного управления университетом, такого, при котором иницируются все звенья, а не только вертикальные связи. Это создаст такое свойство организационной структуры, которое именуется голографическим эффектом, следствием проекции модели сложного на социальную реальность. Перечисленные меры, на наш взгляд, релевантны модели университета, в которой не только ректор имеет законное право на инициативу, научную, коммерческую и управленческую деятельность, но и каждый без исключения студент. Сегодняшние же показатели НИРС и студенческого самоуправления, на которые работает студенческий образцово-показательный авангард, искусно селекционированный управленческим аппаратом, выполняют функцию проходной отчетности перед вышестоящими государственными структурами, но не повышают общий уровень организации жизнедеятельности университета. Необходимость корреляции сложившихся университетских практик в соответствии с требованиями рынка труда и социальных характеристик самих обучающихся возрастает в условиях все увеличивающейся конкуренции между академическими и бизнес-образовательными площадками (бизнес-классы, форумы, off-line классы).

В качестве третьей управленческой интервенции мы предлагаем создание функционирующей на профессиональной основе социологической службы в морском техническом университете с обязательным вовлечением в ее работу обучающихся в вузе социологов в строгом соответствии с проводимой в статье диалектической методологией: взаимопереходы центра и периферии, ролей управляемых и управляющих, обучающихся и обучаемых, авторитетном, но не авторитарном формировании координирующего административного центра. Студенты-социологи, работающие на основе студенческого контракта в социологической службе, могли бы участвовать в научном мониторинге жизнедеятельности университета, формируя свою профессиональную идентичность, а университет решал бы одновременно две задачи. Первая, научно-образовательная, –обеспечение исследовательских площадок для социологов, и вторая, организационная, –создание инструмента, можно сказать безальтернативного, для формирования интерактивной связи между всеми звеньями академического коллектива посредством использования социологических методов: опросов, интервью, репортажей и социологической аналитики.

Косвенным аргументом в пользу конструктивности такой социологической службы может быть эффект социологического опроса, проведенного в 2017 г. по инициативе кафедры философии и социологии и при поддержке тогда исполняющего обязанности ректора Г.А. Туричина в преддверии выборов руководителя СПбГМТУ (тема опроса: «Отношение работников

университета к проводимой в вузе политике», число респондентов – 278). Исследование было проведено в два этапа с целью выявления динамики изменения предмета исследования, с разрывом в четыре месяца. Исследование было задумано в рамках проекта социальной Программы «Формируем доверие». Сам факт готовности руководителя вуза получить объективные оценки и прогнозы относительно деятельности его и его административного аппарата и готовности корректировать свою политику в соответствии с полученной информацией положительно повлияла на повышение его рейтинга среди коллектива университета и, по-видимому, вкупе с его проявившимся опытом, способностями и харизматичностью, сыграл какую-то положительную роль в его победе на выборах: коллективу нужен был ректор, способный к диалогу, в отличие от закрытых стилей руководства некоторых предыдущих руководителей. Об этом свидетельствовала положительная динамика возрастающего доверия (с 37% до 51%).

В заключение напомним, что использование социальных инструментов выделено в качестве одного из семи приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации: «Возможность эффективного ответа российского общества на большие вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий, социальных институтов на современном этапе глобального развития, в том числе применяя методы гуманитарных и социальных наук». [6]

#### Литература

1. Голованова О.В., Солдатов А.В., Солдатов А.А. Проблемы управления в судостроительном образовании // Морские интеллектуальные технологии. №4 (34) Том. 1 2016. С. 130 – 134.
2. Голованова О.В., Вишталъ М.И., Романова В.А., Орешников А.А. Проблемы организации учебного процесса в современном вузе глазами обучающихся //Солидарность и конфликты в современном обществе / Материалы научной конференции XII Ковалевские чтения 15-17 ноября 2018 года. СПб.: Скифия-принт, 2018. С.387-388.
3. Дитон А. Угроза неравенства. Выживет ли гражданское общество? // В мире науки. (11) ноябрь 2016. С. 29 – 34.
4. Руссо Ф. Мы и наши вещи. В мире науки. (7) июль 2018. С. 86 - 92.
5. Солдатов А.В., Голованова О.В., Батрак Л. Социологический сектор в техническом вузе: проблемы, функции, перспективы //Российское социологическое сообщество: история, современность, место в мировой науке /Материалы научной конференции к 100-летию Русского социологического общества имени М.М. Ковалевского 10-12 ноября 2016 года. СПб.: Скифия-принт, 2016. С. 1061-1063.
6. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации». Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642. Пункт 20, ж.

#### References

1. Golovanova O.V., Soldatov A.V., Soldatov A.A. Problemy upravleniya v Sudostroitel'nom obrazovanii. *Morskie intellektual'nye tekhnologii. №4 (34) Tom. 1. 2016. S. 130 – 134.*
2. Golovanova O.V., Vishtal' M.I., Romanova V.A., Oreshnikov A.A. Problemy organizacii uchebnogo processa v sovremennom vuze glazami obuchayushchihsya. *Solidarnost' i konflikty v sovremennom obshchestve. Materialy nauchnoj konferencii XII Kovalevskie chteniya 15-17 noyabrya 2018 goda. SPb.: Skifiya-print, 2018. S.387-388.*
3. Diton A. Ugroza neravenstva. Vyzhivet li grazhdanskoe obshchestvo? *V mire nauki. (11) noyabr' 2016. S. 29 – 34.*
4. Russo F. My i nashi veshchi. *V mire nauki. (7) iyul' 2018. S. 86 - 92.*
5. Soldatov A.V., Golovanova O.V., Batrak L. Sociologicheskij sektor v tekhnicheskom vuze: problemy, funkcii, perspektivy. *Rossijskoe sociologicheskoe soobshchestvo: istoriya, sovremennost', mesto v mirovoj nauke. Materialy nauchnoj konferencii k 100-letiyu Russkogo sociologicheskogo obshchestva imeni M.M. Kovalevskogo 10-12 noyabrya 2016 goda. SPb.: Skifiya-print, 2016. S. 1061-1063.*
6. Strategiya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii». Utverzhdena Ukazom Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 1 dekabrya 2016 g. № 642. Punkt 20, zh.



## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 532.5.032

### ПЕРВАЯ ОСНОВНАЯ ЗАДАЧА ДИНАМИКИ ЛИНЕЙНОЙ ВЯЗКОЙ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

**Сергей Газимурович Кадыров**

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры математики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: skadyrov@gmail.com

**Виталий Владимирович Певзнер**

Старший преподаватель кафедры математики  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
e-mail: vpevzner@mail.ru

#### Аннотация

В статье сформулирована постановка первой основной задачи теории малых колебаний вязкой сжимаемой жидкости. Найдены формулы для расчета главного вектора и главного момента гидродинамических сил, действующих на тело, погруженное в вязкую сжимаемую жидкость. Эти формулы являются аналогом формул для главного вектора и главного момента вектора напряжения в теории упругости и имеют универсальный характер в теории вязкой жидкости. Показано, что система дифференциальных уравнений относительно вектора скорости и давления в такой модели эквивалентна системе уравнений относительно гидродинамических потенциалов. Получено выражение главного вектора и главного момента гидродинамических сил в терминах теории гидродинамических потенциалов. Указан метод решения – метод последовательных приближений, позволяющих свести задачу к ряду классических задач Неймана для эллиптических уравнений относительно потенциалов.

**Ключевые слова:** линеаризованные уравнения Навье-Стокса, вязкая сжимаемая жидкость, гидродинамические потенциалы.

### THE FIRST BASIC PROBLEM OF THE LINEAR DYNAMICS OF VISCOUS COMPRESSIBLE FLUID

**Sergey G. Kadyrov**

The professor of the department of mathematics,  
State Marine Technical University of Sankt-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: skadyrov@gmail.com

**Vitaliy V. Pevzner**

Senior lecturer of the department of mathematics,  
State Marine Technical University of Sankt-Petersburg  
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation  
e-mail: vpevzner@mail.ru

#### Abstract

The article formulates the formulation of the first main problem of the theory of small oscillations of a viscous compressible liquids. Formulas for calculating the main vector and the main moment of hydrodynamic forces acting on a body immersed in a viscous compressible fluid are found. This formula is analogous to the formula for the stress vector in elasticity theory and is universal in viscous fluid theory. It is shown that the system of differential equations with respect to the velocity and pressure vector in this model is equivalent to the system of equations with respect to hydrodynamic potentials. The expression of the main vector and the main moment of hydrodynamic forces in terms of the theory of hydrodynamic potentials is obtained. The method of solution – the method of successive approximations, allowing to reduce the problem to a number of classical elliptic Neumann problems for potentials.

**Key words:** linearized Navier-Stokes equations, viscous compressible fluid, hydrodynamic potentials.

#### Вектор напряжений в вязкой жидкости

Уравнение динамики (уравнения импульса) вязкой сжимаемой вязкой жидкости при условии отсутствия массовых сил в общепринятых обозначениях имеет вид [1]:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \eta \Delta \vec{v} + \left( \zeta + \frac{\eta}{3} \right) \text{grad div } \vec{v}. \quad (1)$$

Здесь  $\eta$  – коэффициент сдвиговой вязкости а  $\zeta$  – объемной вязкости.

Уравнения (1) необходимо дополнить уравнением неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho \vec{v} = 0 \quad (3)$$

и уравнением состояния

$$p = p(\rho). \quad (4)$$

Объемная вязкость  $\zeta$  – в целом, мало изученный параметр. Объемная вязкость воды примерно в три раза больше вязкости сдвига, что объясняет сильное поглощение ультразвуковых волн жидкой водой [3]. Не существует прямых и непосредственных методов измерения объемной вязкости. Для разреженных одноатомных газов теоретически показано ([2,3]), что коэффициент объемной вязкости равен нулю и, по всей вероятности, для слабо плотных газов и жидкостей влияние этого коэффициента результаты расчетов также слабо зависят от объемной вязкости не будет значительным, то есть можно считать, что  $\zeta \approx 0$  (гипотеза Стокса [2]). Однако же для многих жидкостей поглощение энергии за счет вязкости оказывается больше, чем то, которое следует из этого предположения.

Значения  $\zeta / \eta$  для некоторых жидкостей приведены в таблице ([3]).

Жидкость	$T^{\circ}, C$	$\zeta / \eta$
Вода	15	2.81
Глицерин	-14	1.03
Хлористый натрий	888	20.8
Хлористое серебро	571.5	27.6
Бензол	20	130
Сероуглерод	20	1600

В декартовой системе координат тензор вязких напряжений определяется по формулам [1,2]

$$\sigma_{xx} = -p + 2\eta \frac{\partial v_x}{\partial x} + \left(\zeta - \frac{2\eta}{3}\right)\theta, \sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}\right),$$

$$\sigma_{yy} = -p + 2\eta \frac{\partial v_y}{\partial y} + \left(\zeta - \frac{2\eta}{3}\right)\theta, \sigma_{yz} = \sigma_{zy} = \eta \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z}\right),$$

$$\sigma_{zz} = -p + 2\eta \frac{\partial v_z}{\partial z} + \left(\zeta - \frac{2\eta}{3}\right)\theta, \sigma_{zx} = \sigma_{xz} = \eta \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z}\right).$$

Здесь

$$\theta = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}.$$

Найдем вектор напряжения  $\vec{P}_n$  на площадке с нормалью  $\vec{n}$ .

$$\vec{n} = \vec{e}_x n_x + \vec{e}_y n_y + \vec{e}_z n_z,$$

$$\vec{P}_n = \vec{e}_x \sigma_{nx} + \vec{e}_y \sigma_{ny} + \vec{e}_z \sigma_{nz}.$$

Проекция вектора напряжения на ось OX равна

$$\sigma_{nx} = \sigma_{xx} n_x + \sigma_{xy} n_y + \sigma_{xz} n_z.$$

Подставим в эту формулу выражения для напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_{nx} = & \left(-p + \left(\zeta - \frac{2\eta}{3}\right)\theta\right) n_x + \\ & + \eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} n_x + \frac{\partial v_y}{\partial x} n_y + \frac{\partial v_z}{\partial x} n_z\right) + \\ & + \eta \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} n_x + \frac{\partial v_x}{\partial y} n_y + \frac{\partial v_x}{\partial z} n_z\right). \end{aligned}$$

Сумма второго и третьего слагаемых равна

$$2\eta \frac{\partial v_x}{\partial x} n_x + \eta n_y \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y}\right) + \eta n_z \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z}\right).$$

Для дальнейших преобразований найдем вектор  $\vec{n} \times \text{rot} \vec{v}$ .

$$\begin{aligned} \vec{n} \times \text{rot} \vec{v} = & \\ = \vec{n} \times & \left[ \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z}\right) \vec{e}_z + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x}\right) \vec{e}_y + \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y}\right) \vec{e}_x \right] = \\ = \left[ n_y \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y}\right) - n_z \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x}\right) \right] \vec{e}_z + & \\ + \left[ n_z \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z}\right) - n_x \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y}\right) \right] \vec{e}_y + & \\ + \left[ n_x \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x}\right) - n_y \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z}\right) \right] \vec{e}_x. & \end{aligned}$$

Теперь

$$\begin{aligned} 2n_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + n_y \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y}\right) + n_z \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z}\right) = & \\ = 2n_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + n_y \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y}\right) + 2n_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - & \\ - n_z \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x}\right) + 2n_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = & \\ = (\vec{n} \times \text{rot} \vec{v})_x + 2\eta \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial x}\right)_x & \end{aligned}$$

и, окончательно,

$$\sigma_{nx} = \left(-p + \left(\zeta - \frac{2\eta}{3}\right)\theta\right) n_x + \eta (\vec{n} \times \text{rot} \vec{v})_x + 2\eta \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial x}\right)_x.$$

Аналогичные формулы можно выписать для двух других проекций вектора напряжений и на их основе получить векторную формулу уже независимую от выбора координат

$$\vec{P}_n = \left(-p + \left(\zeta - \frac{2\eta}{3}\right)\text{div} \vec{v}\right) \vec{n} + \eta (\vec{n} \times \text{rot} \vec{v}) + 2\eta \frac{\partial \vec{v}}{\partial n}. \quad (2)$$

Эта формула является аналогом формулы для вектора напряжения в теории упругости [5]. При ее выводе использовались лишь выражения для вязких напряжений, поэтому она имеет универсальный характер в теории вязкой жидкости. При поступательном движении тела из формулы можно вывести формулу Слезкина [4] для вязкой несжимаемой жидкости.

**Линейные уравнения динамики малых колебаний вязкой сжимаемой жидкости**

Пусть колеблющееся (деформирующееся) тело находится в покоящейся «на бесконечности» вязкой баротропной жидкости.

Если временной масштаб определяется частотой колебаний  $\omega$ , характерный размер тела имеет порядок  $L$ , амплитуда колебаний  $A$ , то будем называть колебания малыми, при выполнении условия  $A/L = \varepsilon \ll 1$ .

Как показано в [1] линейаризация уравнений динамики вязкой сжимаемой жидкости на фоне состояния покоя, то есть отбрасывание нелинейного конвективного члена с сохранением остальных слагаемых для малых колебаний при выполнении указанного условия оправдана. Заметим, что линейаризация уравнений необходимо приводит к линейаризации граничных условий, причем их придется ставить на "неподвижной" поверхности тела.

Итак. ([1]), в результате линейаризации имеем

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\nabla p + \eta \Delta \vec{v} + \left( \frac{\eta}{3} + \zeta \right) \text{grad div} \vec{v}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 c_0^2 \text{div} \vec{v} = 0. \quad (4)$$

Здесь  $\rho_0, c_0$  – плотность покоящейся жидкости и скорость звука.

Граничные условия «прилипания» на поверхности тела  $S$

$$\vec{v}|_S = \vec{V}_S \quad (5)$$

( $\vec{V}_S$  – вектор скорости тела), на бесконечности возмущения скорости затухают.

**Метод потенциалов**

Между уравнениями (3) и уравнениями линейной динамической упругости имеется явная аналогия. В терминах динамической теории упругости можно говорить о первой основной задаче.

Как известно, любое векторное поле представимо в виде суммы потенциального и соленоидального слагаемых. В работах А.Н.Гузя [2] в соответствии введены функции, которые впредь будем называть «потенциалами» – скалярная  $\varphi$  и векторная  $\vec{\psi}$ , вектор скорости выражается через них по формуле

$$\vec{v} = \text{grad} \varphi + \text{rot} \vec{\psi}. \quad (6)$$

Неопределенность в выборе вектора  $\vec{\psi}$  снимается, если наложить условие калибровки

$$\text{div} \vec{\psi} = 0. \quad (7)$$

Подстановка (6) – (7) в (3) – (4) дает

$$\begin{aligned} \rho_0 \frac{\partial (\text{grad} \varphi + \text{rot} \vec{\psi})}{\partial t} = & \\ = -\text{grad} p + \eta \Delta (\text{grad} \varphi + \text{rot} \vec{\psi}) + & \\ + \left( \frac{\eta}{3} + \zeta \right) \text{grad div} (\text{grad} \varphi + \text{rot} \vec{\psi}), & \end{aligned}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 c_0^2 \text{div} (\text{grad} \varphi + \text{rot} \vec{\psi}) = 0.$$

Так как  $\text{div rot} \vec{\psi} = 0, \text{div grad} \varphi = \Delta \varphi$ , то

$$\begin{aligned} \rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\text{grad} \varphi + \text{rot} \vec{\psi}) = -\text{grad} \frac{\partial p}{\partial t} + & \\ + \eta \frac{\partial}{\partial t} \Delta (\text{grad} \varphi + \text{rot} \vec{\psi}) + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\eta}{3} + \zeta \right) \text{grad} \Delta \varphi, & \end{aligned}$$

$$\text{grad} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 c_0^2 \text{grad} \Delta \varphi = 0.$$

Отсюда, исключая давление, получаем систему уравнений для потенциалов [2].

$$\left( 1 + \frac{1}{\rho_0 c_0^2} \left( \frac{4\eta}{3} + \zeta \right) \frac{\partial}{\partial t} \right) \Delta \varphi = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}, \quad (8)$$

$$\Delta \vec{\psi} = \frac{\rho_0}{\eta} \frac{\partial \vec{\psi}}{\partial t}, \quad (9)$$

и формулу для определения давления

$$p = \rho_0 \left( \frac{\frac{4\eta}{3} + \zeta}{\rho_0} \Delta - \frac{\partial}{\partial t} \right) \varphi. \quad (10)$$

Векторный потенциал  $\vec{\psi}$  определен с точностью до потенциального слагаемого. Неопределенность в его определении снимается условием калибровки. Давление и плотность определяются только скалярным потенциалом. Если считать, что коэффициент объемной вязкости равен нулю, в уравнениях (8) – (10) следует положить  $\zeta = 0$ . В задачах с гармоническим во времени с частотой  $\omega$  изменением всех величин достаточно заменить в уравнениях (8) – (10) символ  $\frac{\partial}{\partial t}$  на множитель  $-i\omega$ :

$$\left( 1 - \frac{i\omega}{\rho_0 c_0^2} \left( \frac{4\eta}{3} + \zeta \right) \right) \Delta \varphi + \frac{\omega^2}{c_0^2} \varphi = 0, \quad (11)$$

$$\Delta \vec{\psi} + \frac{i\omega \rho_0}{\eta} \vec{\psi} = 0, \quad (12)$$

$$p = \rho_0 \left( \frac{\frac{4\eta}{3} + \zeta}{\rho_0} \Delta + i\omega \right) \varphi. \quad (13)$$

Для перехода к модели несжимаемой жидкости нужно перейти к пределу при  $c_0 \rightarrow +\infty$ . В этом варианте уравнение (11) заменяется на уравнение Лапласа

$$\Delta \varphi = 0$$

На поверхности тела ставятся условия прилипания (5), «на бесконечности» потенциалы и их пространственные производные стремятся к нулю.

Итак, задача взаимодействия тела с телом в рассматриваемом случае при условии постановки граничных условий в скоростях сводится к краевой задаче (11) – (13). Покажем, что главный вектор сил и главный момент сил, действующих на тело, погруженное в вязкую сжимаемую жидкость, при гармоническом во времени движении может быть выражен через граничные значения потенциалов.

В этом случае уравнения (11) – (12) записываются в виде

$$\Delta\varphi + k_\varphi^2\varphi = 0, \quad (14)$$

$$\Delta\bar{\psi} + k_\psi^2\bar{\psi} = 0, \quad (15)$$

Здесь введены обозначения

$$k_\varphi = \frac{\frac{\omega}{c_0}}{\sqrt{1 - \frac{i\omega}{\rho_0 c_0^2} \left( \frac{4\eta}{3} + \zeta \right)}}, k_\psi = \sqrt{i\omega \frac{\rho_0}{\eta}}.$$

Давление можно, используя (13) и (14), выразить через потенциал  $\varphi$ :

$$p = i\rho_0\omega\varphi - k_\varphi^2 \left( \frac{4\eta}{3} + \zeta \right) \varphi. \quad (16)$$

Главный вектор сил и главный момент  $\vec{R}$   $\vec{L}$  гидродинамических сил определяются интегрированием вектора напряжения по поверхности тела  $S$ :

$$\vec{R} = \int_S \vec{P}_n dS, \quad \vec{L} = \int_S (\vec{r} \times \vec{P}_n) dS.$$

Вектор напряжения задается формулой (2). Подставляя в нее выражение вектора скорости через потенциалы, получим

$$\vec{P}_n = \left( -p + \left( \zeta - \frac{2\eta}{3} \right) \text{div}(\text{grad}\varphi + \text{rot}\bar{\psi}) \right) \vec{n} + \eta(\vec{n} \times \text{rot}(\text{grad}\varphi + \text{rot}\bar{\psi})) + 2\eta \frac{\partial(\text{grad}\varphi + \text{rot}\bar{\psi})}{\partial n}$$

Из (14) – (16) находим

$$\vec{R} = \int_S \left( (-i\rho_0\omega + 2\eta k_\varphi^2) \varphi \vec{n} + i\rho_0\omega(\vec{n} \times \bar{\psi}) + 2\eta \frac{\partial(\text{grad}\varphi + \text{rot}\bar{\psi})}{\partial n} \right) dS \quad (17)$$

$$\vec{L} = \int_S \left( \vec{r} \times (-i\rho_0\omega + 2\eta k_\varphi^2) \varphi \vec{n} + \eta \vec{r} \times (\vec{n} \times \text{rot}(\text{rot}\bar{\psi})) + 2\eta \vec{r} \times \frac{\partial(\text{grad}\varphi + \text{rot}\bar{\psi})}{\partial n} \right) dS. \quad (18)$$

В дальнейших выкладках будут систематически использоваться формулы векторного анализа для векторного поля  $\vec{F}$  и скалярного поля  $f$

$$\text{rot grad } f = 0, \quad \text{rot rot } \vec{F} = \text{grad div } \vec{F} - \Delta \vec{F},$$

$$\int_S \vec{n} \times \vec{F} dS = \int_V \text{rot } \vec{F} dV,$$

$$\text{rot}(f \vec{r}) = f \text{rot } \vec{r} - \vec{r} \times \text{grad } f = -\vec{r} \times \text{grad } f,$$

формулы Грина, Гаусса-Остроградского и «интегрирования по частям»

$$\int_S f n_x dS = \int_V \frac{\partial f}{\partial x} F dV, \quad \int_S \frac{\partial \vec{F}}{\partial n} dS = \int_V \Delta \vec{F} dV,$$

$$\int_S \vec{F} \cdot \vec{n} dS = \int_V \text{div } \vec{F} dV,$$

( $V$  – внешняя по отношению к поверхности тела область) и непосредственно проверяемые соотношения:

$$\Delta(\vec{r} \times \text{grad } f) = \vec{r} \times \Delta \text{grad } f + 2 \text{rot grad } f,$$

$$\text{grad}(\vec{r} \vec{F}) = (\bar{\psi} \vec{F}) \vec{r} + (\vec{r} \nabla) \vec{F} + \vec{F} \times \text{rot } \vec{r} + \vec{r} \times \text{rot } \vec{F}.$$

Найдем вектор  $\vec{R}$ .

$$\int_S \frac{\partial \text{grad } \varphi}{\partial n} dS = \int_V \Delta \text{grad } \varphi dV = \int_V \text{grad } \Delta \varphi dV =$$

$$= -k_\varphi^2 \int_V \text{grad } \varphi dV = -k_\varphi^2 \int_S \varphi \vec{n} dS,$$

$$\int_S \frac{\partial \text{rot } \bar{\psi}}{\partial n} dS = \int_V \Delta \text{rot } \bar{\psi} dV = \int_V \text{rot } \Delta \bar{\psi} dV =$$

$$= -k_\psi^2 \int_V \text{rot } \bar{\psi} dV = -k_\psi^2 \int_V \vec{n} \times \bar{\psi} dV.$$

Подставим в определение вектора силы эти выражения, обнаруживаем, что:

$$\vec{R} = \int_S (-i\rho_0\omega\varphi \vec{n} + i\rho_0\omega(\vec{n} \times \bar{\psi})) dS. \quad (19)$$

Формула (19) – обобщение ее двумерного варианта, полученного в [6], на трехмерный случай.

Найдем вектор  $\vec{L}$ .

Определим  $\int_S (\vec{r} \times (\vec{n} \times \text{rot}(\text{rot}\bar{\psi}))) dS$ :

$$\vec{r} \times (\vec{n} \times \text{rot}(\text{rot}\bar{\psi})) = -\vec{r} \times (\vec{n} \times \Delta \bar{\psi}) = -k_\psi^2 \vec{r} \times (\vec{n} \times \bar{\psi}),$$

$$\int_S (\vec{r} \times (\vec{n} \times \text{rot}(\text{rot}\bar{\psi}))) dS = -k_\psi^2 \int_S (\vec{r} \times (\vec{n} \times \bar{\psi})) dS.$$

Рассмотрим вектор  $\int_S \vec{r} \times \frac{\partial \text{grad } \varphi}{\partial n} dS$ :

$$\int_S \vec{r} \times \frac{\partial \text{grad } \varphi}{\partial n} dS = \int_S \frac{\partial(\vec{r} \times \text{grad } \varphi)}{\partial n} dS - \int_S \frac{\partial \vec{r}}{\partial n} \times \text{grad } \varphi dS,$$

$$\int_S \frac{\partial \vec{r}}{\partial n} \times \text{grad } \varphi dS = \int_S \vec{n} \times \text{grad } \varphi dS = \int_V \text{rot grad } \varphi dV = 0,$$

$$\int_S \frac{\partial(\vec{r} \times \text{grad } \varphi)}{\partial n} dS = \int_V \Delta(\vec{r} \times \text{grad } \varphi) dV,$$

$$\Delta(\vec{r} \times \text{grad } \varphi) = \vec{r} \times \Delta \text{grad } \varphi + 2 \text{rot grad } \varphi = \vec{r} \times \Delta \text{grad } \varphi =$$

$$= -k_\varphi^2 \vec{r} \times \text{grad } \varphi,$$

$$\int_S \frac{\partial(\vec{r} \times \text{grad } \varphi)}{\partial n} dS = k_\varphi^2 \int_V \text{rot}(\varphi \vec{r}) dV = k_\varphi^2 \int_S \vec{n} \times (\varphi \vec{r}) dS.$$

Осталось вычислить  $\int_S (\vec{r} \times \frac{\partial \text{rot } \bar{\psi}}{\partial n}) dS$ :

$$\int_S (\vec{r} \times \frac{\partial \text{rot } \bar{\psi}}{\partial n}) dS = \int_S \frac{\partial}{\partial n} (\vec{r} \times \text{rot } \bar{\psi}) dS - \int_S \frac{\partial \vec{r}}{\partial n} \times \text{rot } \bar{\psi} dS,$$

$$\int_S \frac{\partial \vec{r}}{\partial n} \times \text{rot } \bar{\psi} dV = \int_S \frac{\partial \vec{r}}{\partial n} \times (\text{rot } \bar{\psi} + \text{grad } \varphi) dS =$$

$$= \int_S \vec{n} \times \bar{\psi} dS = \int_S \vec{n} \times \bar{\psi}_S dS,$$

$$r \times \text{rot} \vec{\psi} = \text{grad}(\vec{r} \vec{\psi}) - (\vec{\psi} \nabla) \vec{r} - (\vec{r} \nabla) \vec{\psi},$$

$$(\vec{\psi} \nabla) \vec{r} = \vec{\psi},$$

$$(\vec{r} \nabla) \vec{\psi} = \vec{e}_x \text{div}(\vec{r} \psi_x) + \vec{e}_y \text{div}(\vec{r} \psi_y) + \vec{e}_z \text{div}(\vec{r} \psi_z) - 3\vec{\psi}.$$

Теперь

$$\int_S \frac{\partial}{\partial n} (\vec{r} \times \text{rot} \vec{\psi}) dS = -\beta \int_V (\text{grad}(\vec{r} \vec{\psi}) - \vec{e}_x \text{div}(\vec{r} \psi_x) - \vec{e}_y \text{div}(\vec{r} \psi_y) - \vec{e}_z \text{div}(\vec{r} \psi_z) + 2\vec{\psi}) dV + 2 \int_S \vec{n} \times \vec{v} dS =$$

$$= 2 \int_V \vec{n} \times \text{rot} \vec{\psi} dV = 2 \int_V \vec{n} \times \vec{V}_S dS,$$

и, наконец,

$$\vec{L} = \int_S (-\vec{r} \times i\omega \rho_0 \vec{\omega} \vec{n} + i\omega \rho_0 (\vec{r} \times \vec{n} \times \vec{\psi}) + 2\eta (\vec{n} \times \vec{V}_S)) dS. (20)$$

Заметим, что выражения (19)–(20), применяя аналогичные преобразования, можно использовать и при рассмотрении нестационарных движений тела,

заменяя  $i\omega$  на  $\frac{\partial}{\partial t}$ .

В [4] формула (19) для главного вектора сил была доказана для случая плоскопараллельного движения твердого тела в несжимаемой жидкости.

### Метод последовательных приближений

Рассмотрим систему уравнений (11)–(12). Для каждого из этих классических уравнений математической физики естественной постановкой краевой задачи является задача Неймана – найти решение при условии, что на границе задана нормальная производная функции. Однако условие "прилипания" и формулы (5),(6) "требуют" знания производных потенциалов не только по нормали, но и по касательным направлениям. Исходя из физических соображений при условии "малого" влияния вязкости можно предложить следующий алгоритм. Найдем потенциал  $\varphi$  в условиях отсутствия вязкости (то есть решение задачи в рамках теории идеальной жидкости), затем из условия "прилипания" выделим производную потенциала  $\vec{\psi}$  по нормали (можно показать, что это реализуемо, по крайней мере, для плоской и осесимметричной задач), и решим уравнение (12) при заданной нормальной производной на границе, затем снова обратимся к уравнению (11), то есть найдем "малую" добавку к потенциалу  $\varphi$  и т.д. Строгого обоснования такого метода нет, однако в [8] такой подход с успехом был применен для решения задачи гидроупругости оболочек.

### Литература

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, физ.-мат. лит., 1986. – 736 с.
2. Гузь А. Н. Динамика сжимаемой вязкой жидкости. Киев: А.С.К., 1998. – 350 с.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, физ.-мат. лит., 1974. – 712 с.
4. Litovitz, T.A. and Davis, C.M. In «Physical Acoustics», Ed. W.P.Mason, vol. 2.
5. Слѣзкин Н. А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: Гос. Изд-во технико-теоретической литературы, 1955. – 520 с.
6. Партон В.З., Перлин Л.И. Методы математической теории упругости. ГИМФЛ. М.: Наука, 1981 – 688 с.
7. Кадыров С. Г. Метод граничных интегральных уравнений в задаче о малых колебаниях тел в сжимаемой вязкой жидкости // Морской вестник – 2013. – Спец. вып. № 1 (10) – с. 85-87.
8. Кадыров С. Г., Гриценко Т.В. Свободные колебания жестко защемленной оболочки, погруженной в вязкую слабо сжимаемую жидкость. "Dynamical Systems Modelling and Stability Investigation". Научн. конф. (25-29 мая 1999 г.): Тезисы докладов. Киев, 1999. – с. 25.

### References

1. Landau L. D., Lifshits E. M. Teoreticheskaya fizika. T. VI. Hidrodinamika. M.: Nauka, fiz.-mat. lit., 1986. 736 p.
2. Guz A. N. Dinamika szhimaemoy vyazkoy zhidkosti. Kiev: A.S.K., 1998. 350 p.
3. Shlikhting G. Teoriya pogranichnogo sloya. M.: Nauka, fiz.-mat. lit., 1974. 712 p.
4. Litovitz, T.A. and Davis, C.M. In «Physical Acoustics», Ed. W.P.Mason, vol. 2.
5. Slezkin N. A. Dinamika vyazkoy neszhimaemoy zhidkosti. M.: Gos. Izd-vo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1955. 520 p.
6. Parton V.Z., Perlin L.I. Metody matematicheskoy teorii uprugosti. GIMFL. M.: Nauka, 1981. 688 p.
7. Kadyrov S. G. Metod granichnykh integralnykh uravneniy v zadache o malykh kolebaniyakh tel v szhimaemoy vyazkoy zhidkosti. Morskoy vestnik, 2013. Spets. vyp. № 1 (10), pp. 85-87
8. Kadyrov S. G., Gritsenko T.V. Svobodnye kolebaniya zhestko zashchemlennoy obolochki, pogruzhennoy v vyazkuyu slabo szhimaemuyu zhidkost. "Dynamical Systems Modelling and Stability Investigation". Nauchn. konf. (25-29 maya 1999 g.): Tezisy dokladov. Kiev, 1999. – p. 25.





## Научный журнал ВАК и WEB of SCIENCE «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Электронное сетевое (ISSN 2588-0233) и печатное (ISSN № 2073-7173) издание  
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3

e-mail: [mit-journal@mail.ru](mailto:mit-journal@mail.ru) [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов.

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – публичная оферта размещена на сайте [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)
3. Одна рецензия на публикуемую статью по соответствующей специальности с подписью, заверенной гербовой печатью. При междисциплинарном исследовании предоставляются две рецензии от экспертов различных областей наук по соответствующей тематике.
4. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
5. Лицензионный договор и акт к нему от каждого из авторов
6. Рубрикатор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) могут быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу [mit-journal@mail.ru](mailto:mit-journal@mail.ru) (поэтому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

Документы должны быть присланы по почте в адрес редакции.

**На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.**

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом может быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

**Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.**

**Стоимость публикации с 2019г. 12000 рублей по выставяемому по запросу счету.**

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

Главный редактор научного журнала  
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"  
д.т.н. проф. Никитин Н.В.



**Есть на складе издательства НИЦ МОРИНТЕХ****Гайкович А. И.****Основы теории проектирования сложных технических систем, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.**

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: **цена 420 руб. + пересылка**

**Архипов А. В., Рыбников Н. И.****Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.**

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

**Караев Р. Н., Разуваев В. Н., Фрумен А. И., Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений. Учебник для вузов, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.**

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

**Шауб П. А.****Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.**

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

**Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей, СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.**

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

**Гайкович А. И.****Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2, СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014**

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).

Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**