

# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

100110100110111110011100100100011000101001110100100011000110101011110100001001001010010011  
010001101100001101101000101001001110100111001101001110100110101000011101100111001010  
11001011110001001100001101101110100010011010011100100010100101010011101001010010100100001  
01010001101110100100010011101100001011001110100100111010010100111001001010101010101001001100100001  
11010110000101011110100100010110101010110001011010101011010010100111001001010101010100110011101110  
1001101001101111100110010001100010100111010010001100011010101110100001001001010010011  
0100011011000001101100001010010011101001001110011010011101001000011101100111001010  
11001011110001001100001101101110100010011010011100100010100101010100111010010100100001  
0101000110111010010001001110110000101100111010010011101001010101001110100101001110100001  
11010110000101011110100100110101010110001011010101011010010101010101010101010010011001110  
10011010011011111001100100011000101001110100100011000110101011101000010010010100100110011  
0100011011000001101100001010010011101001001110011010011101001000011101100111001010

№ 3 (25) т.1 2014

Северное ПКБ  
Газовоз ледового плавания



0100011011000001101101100010100100111010011101001110100110101006011101100111001010  
1100101111000100110000110110111010001001101001001110010001010010101000110101110100001  
01010001101110100010000100111011000010110011101010011101001100010101011010010011001110  
1101011000010101111001001101101010110001011010101101001010101101001010111010101  
1001101001101111100110010001100010100111010010101100011010101010101111010101  
010001101100000110110110001010010011101001001110011010011101001000011101100111001010





# МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 3 (25) Т.1 2014 [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)

Тематика: кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление

**Главный редактор:** Н.В. Никитин, д.т.н., профессор

## Редакционный Совет

### Сопредседатели

И.Г.Захаров, вице-президент ОАО "Объединенная судостроительная корпорация"

Е.М. Апполонов, Ректор СПбГМТУ

### Члены Совета

А.В. Архипов, начальник НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ

М.И. Вайнерман генеральный директор ЦКБ "ЛАЗУРПИТ"

В.А. Василенко, генеральный директор НИТИ им.

А.П. Александрова

А.И. Гайкович генеральный директор НИЦ "МОРИНТЕХ"

Г.Н. Муру, генеральный директор 51 ЦКТИ судоремонта

К.В. Рождественский, проректор по международному сотрудничеству СПбГМТУ

С.П. Столяров, декан факультета корабельной энергетики и автоматики СПбГМТУ

В.Н. Тряскин, проректор СПбГМТУ по учебной работе

А.К. Филимонов, проректор СПбГМТУ по научной работе

А.В. Шляхтенко, генеральный директор-генеральный конструктор ЦМКБ «Алмаз»

## Редакционная коллегия

### Заместители главного редактора

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

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

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

### Члены Редколлегии

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

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

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

А.И. Голосов д.т.н. профессор Центр Технологии Судостроения и Судоремонта

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

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

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

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

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

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

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

Б.А. Царев д.т.н. профессор Санкт-Петербургский государственный морской технический университет.

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

**Свидетельство о регистрации СМИ** ПИ № ФС77-32382 от 09.06.2008

**ISSN 2073-7173**

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

**Телефон/факс** +7 (812) 513-04-51

**e-mail:** mit-journal@mail.ru

**Решением Президиума ВАК** научный журнал «Морские интеллектуальные технологии» включен в перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты докторских и кандидатских диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук <http://vak.ed.gov.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 разрешения редакции**

## Редакционная этика научного журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

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

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

Верстка: Н.Н. Скориантова

Дизайн: А.В. Антонов



# MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 3 (25) V.1 2014 [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)

**Subject:** shipbuilding, computer science, computer engineering and management

**Chief Editor:** N. V. Nikitin, Doctor of Engineering, Professor

## Editorial Board

### Co-chairmen

I.G.Zakharov, Vice-President JSC United Shipbuilding Corporation

E.M. Appolonov, Rector Saint-Petersburg State Marine Technical University

### Council Members

A.V Arkhipov, Head Research Institute of Shipbuilding and armaments of the Ministry of Defence of Russia

M.I. Vajnerman, General Director ZKB Lasurit

V.A. Vasilenko, General Director NITI im.

A.P. Aleksandrova

A.I. Gajkovich, General Director Research Centre Marine Intelligent Technologies

G.N. Muru, General Director 51 CCIS, K.V. Rozhdestvenskij, Vice-Rector for International Science & Education Saint-Petersburg State Marine Technical University

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

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

A.K. Filimonov, Vice-Rector for Science Saint-Petersburg State Marine Technical University

A.V. Shlyakhtenko, General Director-General Designer ZMKB Almaz

## Editorial Staff

### Deputy Chief Editors

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

A. I. Frumen, Candidate of Science, Professor St. Petersburg State Marine Technical University

P. A. Shaub, Doctor of Engineering, Professor Institute of Shipbuilding and armaments of the Ministry of Defence of Russia

### Members of Editorial Staff

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

A. E. Bogdanov, Candidate of Science, Control Systems JSC

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

A. I. Golosov, Doctor of Engineering, Professor Centre of Ship Building and Ship Repair Technology

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

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

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

V. V. Rodionov, Candidate of Science, Senior Research Scientist Sea Project

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

O. V. Tretyakov, Doctor of Engineering, Associated Professor — Institute of Shipbuilding and armaments of the Ministry of Defence of Russia

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

B. A. Tsaryov, Doctor of Engineering, Professor St. Petersburg State Marine Technical University

**Founder-Publisher:** JSC Research Centre Marine Intelligent Technologies

Registration Certificate ПИ № ФС77-32382 от 09.06.2008

**ISSN 2073-7173**

**Address:** Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation

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

**e-mail:** mit-journal@mail.ru

**By the decision of the Council of VAK** the scientific journal MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES is entered on the list of the list of leading scientific magazines and edition published in the Russian Federation where basic scientific outcomes of doctoral dissertations shall be published <http://vak.ed.gov.ru>

Printed in the Printing-House Research Centre Marine Intelligent Technologies

Authors and advertises 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 staff.

**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 the practices of influential international journals and publishers.

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

Page-proofs: N.N. Skoriantova

Design: A.V. Antonov

**СОДЕРЖАНИЕ*****Проектирование кораблей и судов***

**Антоненко С. В., Бугаев В. Г., Вертиков В. Н.** Особенности балластировки передаточного плавучего дока ..4

**Тенишев П. Г., Виноградов Д. Н.** Рабочий стол информационной поддержки базирования и боевого применения целевой военной техники .....11

***Теория корабля и строительная механика***

**Мамонтов А. И., Цимбельман Н. Я., Чернова Т. И.** Устойчивость подпорного сооружения гравитационного типа на податливом основании .....16

**Новиков В. В., Герман А. П.** Определение предельной ширины катамарана с точки зрения прочности.....25

**Грибиниченко М. В., Куренский А. В., Гладкова Н. А., Куценко Н. В.** Расчетная схема радиального лепесткового гибридного подшипника .....30

**Антоненко С. В., Китаев М. В., Немкин Д. В.** Обеспечение прочности конструкций баржи и слипа при передвижке тяжеловесного груза .....36

**Ляховицкий А. Г., Лвин Мин Кхант** Влияние мелкой воды на мореходные качества скоростных катамаранов .....44

***Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства***

**Славгородская А. В., Молоков К. А., Погодаев А. В., Немкин Д. В.** К разработке технологии проектирования и изготовления гребных винтов с повышенными упругодемпфирующими свойствами .....51

***Эксплуатация судов***

**Казанов Г. Т., Новиков В. В.** Обеспечение ресурса корпусов судов.....58

**Миронов А. С., Новиков В. В.** О коррозионном износе и повреждаемости судовых конструкций .....63

***Морское приборостроение***

**Легуша Ф. Ф., Невеселова К. В.** Широкополосные термоакустические источники звука – термофоны .....71

**Скориантов Н. Н., Мишура Т. П., Парфёнова В. О.** Метрологическое обеспечение систем вибрационного мониторинга измерительной техники .....78

***Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ***

**Камил М. С.** Вычисление интеграла Митчела волнового сопротивления для однокорпусного судна методом конечного корня .....83

**Камил М. С.** Вычисление интеграла Така-Лазаускаса волнового сопротивления для катамарана с функцией Ньюмена волновой амплитуды методом конечного корня .....91

**Бураковский П. Е., Нечаев Ю. И.** Практическая реализация графоаналитической системы контроля прочности промысловых судов при посадке на мель, столкновении судов и входе в ледовое поле на основе современной теории катастроф .....99

**CONTENTS*****Design ships***

<b>Antonenko S. V., Bugaev V. G., Vertikov V. N.</b> The features of transfer floating dock ballasting .....	4
<b>Tenisheff P. G., Vinogradov D. N.</b> Desk information support of basing and combat application of the target of military equipment .....	11

***Theory of the ship and structural mechanics***

<b>Mamontov A. I., Tsimbelman N. Ya., Chernova T. I.</b> Stability of retaining wall of gravitational type on the compressive bedding soil .....	16
<b>Novikov V. V., German A. P.</b> Definition limiting width of catamaran in terms of strength .....	25
<b>Gribinichenko M. V., Kurenskii A. V., Gladkova N. A., Kutsenko N. V.</b> Calculation scheme of the radial foil hybrid bearing .....	30
<b>Antonenko S. V., Kitaev M. V., Nemkin D. V.</b> Barge and slip structural strength ensure at shifting of a heavy cargo .....	36
<b>Lyakhovitsky A. G., Lwin Min Khant</b> Influence of shallow water on seaworthiness of high speed catamarans .....	44

***Technology of shipbuilding, ship repair and shipbuilding business***

<b>Slavgorodskaya A. V., Molokov K. A., Pogodaev A. V., Nemkin D. V.</b> About the development of a design and manufacturing technology for screw propeller with increased elastic-damping properties .....	51
--	----

***Operation of ships***

<b>Kazanov G. T., Novikov V. V.</b> Support of the service life of the ship's hull .....	58
<b>Mironov A. S., Novikov V. V.</b> About corrosion wear and damageability ship structures .....	63

***Marine electronics***

<b>Legusha F. F., Neveselova K. V.</b> Broadband thermo-acoustic sound sources – thermophones .....	71
<b>Skoriantov N. N., Mishura T. P., Parfyonova V. O.</b> Measurement assurance of vibration monitoring measurement technique .....	78

***Mathematical modeling, numerical methods and complexes of programs***

<b>Kamil M. S.</b> Solving Michell Ship Wave Resistance Integral of Mono-Hull Ships by Final Root Method .....	83
<b>Kamil M. S.</b> Solving Tuck-Lazauskas Ship Wave Resistance Equation of Twin-Hull Ships in Conjunction With Newman Wave Amplitude Function by Final Root Method .....	91
<b>Burakovskiy P. E., Nechaev Yu. I.</b> Practical realization of graphic-analytical control system of fishing vessel strength at grounding, collision and entering ice field on the basis of modern catastrophe theory .....	99

## О ЖУРНАЛЕ

### Главное

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**

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

Аннотации выпусков журнала приведены на сайте [www.morintex.ru](http://www.morintex.ru)

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

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

### Тематика

Тематика журнала соответствует следующим специальностям научных работников номенклатуры ВАК: 05.08.00 – кораблестроение (05.08.01 – Теория корабля и строительная механика, 05.08.03 – проектирование и конструкция судов, 05.08.04 – технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства, 05.08.05 – Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные), 05.08.06 – Физические поля корабля, океана, атмосфера и их взаимодействие); 05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление (05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации, 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, 05.08.10 – управление в социальных и экономических системах, 05.13.11 – математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей, 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования, 05.13.17 – Теоретические основы информатики, 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ).

### Основные направления

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

### Справочный отдел

В журнале предусмотрена непериодическая рубрика "Справочный отдел". В ней предполагается печатать проекты нормативных и справочных документов, которые, по мнению редакции, могут представить интерес для широкого круга специалистов.

Предварительное обсуждение таких материалов профессиональным сообществом, позволит, с одной стороны указать авторам документа на его слабые места, а с другой стороны – позволит ускорить его внедрение.

## Проектирование кораблей и судов

УДК 629.5.08

### ОСОБЕННОСТИ БАЛЛАСТИРОВКИ ПЕРЕДАТОЧНОГО ПЛАВУЧЕГО ДОКА

**Антоненко Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры Кораблестроения и океанотехники  
Дальневосточный федеральный университет, Инженерная школа,  
кафедра Кораблестроения и океанотехники  
Владивосток, Россия  
E-mail: antonenko48@rambler.ru

**Бугаев Виктор Григорьевич**, доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры Кораблестроения и океанотехники  
Дальневосточный федеральный университет, Инженерная школа,  
кафедра Кораблестроения и океанотехники  
Владивосток, Россия  
E-mail: v\_bugaev@mail.ru

**Вертиков Владимир Николаевич**, магистр  
аспирант кафедры Кораблестроения и океанотехники  
Дальневосточный федеральный университет, Инженерная школа,  
кафедра Кораблестроения и океанотехники  
Владивосток, Россия  
E-mail: vlad\_2008@inbox.ru

#### АННОТАЦИЯ

В связи со списанием большого количества отслуживших свой срок атомных подводных лодок (АПЛ) на Северном и Тихоокеанском флотах созданы комплексы по долговременному хранению реакторных отсеков списанных АПЛ. Такой комплекс на Дальнем Востоке обслуживается специально построенным транспортно-передаточным плавучим доком «Сакура». Док обеспечивает подъём с воды трёхотсечных блоков АПЛ, их транспортировку к береговой площадке и выгрузку на берег с помощью транспортного модуля, включающего гидравлические судовозные тележки. Кроме реакторных отсеков АПЛ, долговременному хранению подлежат и некоторые другие объекты, включая специальные суда, обслуживающие АПЛ.

В ходе эксплуатации дока возникали ситуации, которые могли привести к серьёзным авариям. Эти ситуации были связаны с неудачными проектными инструкциями по проведению доковой операции, включая балластировку дока в процессе передвижки объекта на береговую площадку.

При разработке проекта выгрузки на берег специальной баржи, длина которой заметно превышала длину дока, были выполнены исследования реакций тележек транспортного модуля при передвижке и разработаны практические рекомендации.

Приводятся рекомендации по балластировке транспортно-передаточного плавучего дока «Сакура» в процессе передвижки объекта на береговую площадку. Сообщается о некоторых результатах внедрения этих рекомендаций.

**Ключевые слова:** хранение радиоактивных отходов, атомные подводные лодки, передаточный плавучий док, балластировка.

#### THE FEATURES OF TRANSFER FLOATING DOCK BALLASTING

**Antonenko Sergey Vladimirovich**, professor, Dr.Sci.Tech.,  
professor of Ship building and ocean engineering department  
Far Eastern Federal University, School of Engineering, Ship building  
and ocean engineering department  
Vladivostok, Russia  
E-mail: antonenko48@rambler.ru

**Bugaev Viktor Grigorevich**, professor, Dr.Sci.Tech.,  
professor of Ship building and ocean engineering department  
Far Eastern Federal University, School of Engineering, Ship building  
and ocean engineering department  
Vladivostok, Russia  
E-mail: v\_bugaev@mail.ru

**Vertikov Vladimir Nikolaevich**, Master degree  
Graduate student of Ship building and ocean engineering department  
Far Eastern Federal University, School of Engineering, Ship building  
and ocean engineering department  
Vladivostok, Russia  
E-mail: vlad\_2008@inbox.ru

## ABSTRACTS

Due to the decommissioning of a large number of overage nuclear powered submarines (NPS) in the Northern and Pacific Fleets complexes for long-term storage of reactor compartments of decommissioned nuclear powered submarines were arranged. Such a complex in the Far East is served by a specially built transport and transfer floating dock "Sakura". The dock ensures lifting of NPS three-compartment units from the water surface, their transportation to the coastal area and their unloading ashore with the transport module which includes hydraulic-ship-carrying trucks. In addition to NPS reactor compartments, some other objects, including the special ships which provide for NPS service are subject to long-term storage.

During the operation of the dock, there were situations that could lead to serious accidents. These situations were associated with ineffectual project instructions for docking operations to be made, including the ballasting of the dock in the process of shifting the object onto the coastal area.

During the development of the project for unloading ashore of a special barge, the length of which was much greater than the length of the dock, the reactions of transport module trucks during shifting were studied and practical recommendations were developed.

The abstract provides for the guidelines on ballasting of the transport and transfer floating dock "Sakura" in the process of shifting the object onto the coastal area. Some results of the implementation of these recommendations are reported..

**Key words:** storage of radioactive wastes, nuclear powered submarines, transfer floating dock, ballasting.

## Введение

Спуск судна на воду – всегда торжественное событие, которому придаётся символический смысл: будучи построенным на суше, оно впервые оказывается в родной стихии. И хотя после этого обычно начинается процесс достройки на плаву, порой довольно длительный, именно со спуском на воду обычно связывают рождение нового судна.

Многие годы суда строились преимущественно на наклонных стапелях и спускались на воду под действием сил собственного веса. Такой способ постройки имел свои плюсы и минусы. Но постепенно, особенно для крупнотоннажных судов, стал получать распространение горизонтальный способ постройки судов в эллингах или на открытых стапелях. В этом случае спуск часто производится с помощью передаточного плавучего дока. Такой док оборудуется возвышающейся над стапель-палубой эстакадой с уложенными на ней рельсовыми путями. На эстакаде формируется доковое опорное устройство (ДОУ). На причале также имеются рельсовые пути, продолжением которых служат рельсовые пути на доке. Судно транспортируется на системе тележек, оборудо-

ванных гидравлическими домкратами. Домкраты могут иметь индивидуальную или, что предпочтительнее, групповую систему питания. В последнем случае все домкраты объединяются в несколько (не менее трёх) групп, причём нагрузки на тележки в пределах одной группы одинаковы. Три группы тележек позволяют обеспечить выполнение условий статического равновесия (равнодействующие сил веса и реакций тележек равны по величине и лежат на одной вертикали).

Для проведения операции спуска док подводится к причалу и отцентровывается, в его отсеки принимается балласт, при этом док опирается на береговые и подводные опоры. После этого производится накатка судопоезда на док. По мере продвижения судопоезда и роста нагрузки на док от сил веса судопоезда, из отсеков pontона дока во избежание перегрузки опор необходимо в определённой последовательности откачивать балласт.

Вопросам эксплуатации и расчётов обычных ремонтных доков посвящена обширная литература; достаточно вспомнить монографии, в которых рассматриваются стальные [1] и железобетонные [2] доки, а также вопросы расчёта и проектирования доковых опорных устройств [3]. Однако авто-

ру известна лишь одна монография, посвящённая передаточным плавучим докам [4] и вышедшая сравнительно небольшим тиражом. В ней подробно рассмотрены вопросы, связанные с расчётами прочности дока и ДОУ, но не освещаются проблемы балластировки.

В Приморском крае, на берегу одной из бухт залива Петра Великого, начал работу комплекс по долговременному хранению реакторных отсеков подлежащих утилизации атомных подводных лодок (АПЛ), а также других объектов, представляющих радиационную опасность. Там же построены специализированные сооружения для двух аварийных АПЛ [5]. В состав комплекса входят береговая площадка, специально построенный и безвозмездно переданный России Японией транспортно-передаточный док «Сакура», обслуживающий его буксир и ряд других объектов. Стальной док имеет один понтон и две башни, его длина по стапель-палубе составляет 65 м, а проектная грузоподъёмность – 3500 т [6].

Выведенные из состава флота АПЛ были частично разделаны, а реакторные отсеки с двумя примыкающими к ним в носу и в корме отсеками находятся на плаву вблизи берега (см. рис. 1). Для перевода на площадку долговременного хранения блок буксируется к котловану, туда же буксируется док «Сакура», который принимает блок на подготовленное ДОУ. После этого док с блоком подводится носом к причалу, в отсеки понтона принимается балласт так, чтобы док сел на береговые и подводные опоры. С берега на док подаётся транспортный модуль, содержащий несколько пар тележек, оборудованных гидрорамками. Он поднимает блок с опорами и транспортирует на берег, где реакторный отсек отделяется от смежных, подлежащих разделке, и консервируется.

Японская сторона представила подробную инструкцию по балластировке дока в зависимости от массы поднимаемого блока и положения судопоезда в процессе передвижки. Анализ этой инструкции показал, что она исходит из положения, что на каждом этапе передвижки вес дока с балластом и судопоездом должен уравновешиваться силами поддержания, тогда как опоры по возможности (это условие не всегда оказывается выполнимым) не должны нести нагрузки.



Рис. 1. Трёхотсечные блоки в бухте

Практика проведения первых операций с трёхотсечными блоками обнаружила потенциальную опасность такой рекомендации, которая заключается в возможности всплытия одной из оконечностей дока, самопроизвольного движения судопоезда с нарастанием дифферента. Это потребо-

вало более детального анализа имеющейся документации по доку, специальной литературы и опыта работы комплекса. В результате удалось разработать рекомендации по безопасному проведению операции по выкатке судопоезда на береговую площадку.

Кроме реакторных отсеков АПЛ, утилизации подлежат и другие объекты, в число которых входят специальные суда для хранения радиоактивных отходов (несамоходные баржи типа ТНТ). Док «Сакура» по своим характеристикам не был рассчитан на операции с ТНТ. В связи с необходимостью разделки этих судов, отслуживших свой срок, ДальРАО обратилось к проектанту дока с запросом относительно возможности подъёма ТНТ доком «Сакура» без его размерной модернизации, на что японская сторона ответила категорическим отказом. Последовало обращение ДальРАО в Морскую инженерную компанию, которая привлекла к работе автора данной статьи. Совместная работа дала положительный результат.

Данная работа выполнялась в тесном сотрудничестве со специалистами ДальРАО и Морской инженерной компании, г. Владивосток.

## 1. Общие соображения о балластировке

Очевидно, что работа передаточного дока в составе спускового комплекса и транспортно-передаточного дока, рассматриваемого в данной статье, имеет много общего и должна основываться на одних и тех же принципах. Различие может быть связано практически лишь с системами питания гидрорамок – индивидуальной или групповой. С доком «Сакура» работает транспортный модуль, имеющий групповую систему питания. Это позволяет считать, что все тележки несут практически одинаковую нагрузку.

Определённая специфика дока «Сакура» связана с тем, что при небольшой длине (65 м) он имеет большую высоту борта (22,1 м) и, соответственно, большую жёсткость при общем продольном изгибе. Следовательно, нет оснований беспокоиться за его общую продольную прочность, а также за то, что из-за деформаций продольного (и поперечного) изгиба может быть исчерпан ход плунжеров домкратов.

Вполне очевидно, что поддержание равновесия сил веса и сил поддержания в процессе перемещения судопоезда недостижимо. При избытке сил веса док будет прижиматься к опорам, при их недостатке – всплыть, отрываясь или одной, или обеими оконечностями. На береговых опорах (рис. 2) могут возникать повышенные контактные напряжения, способные вызвать нежелательные деформации, подводные опоры при перегрузках будут проседать, нарушая посадку дока при выгрузке блока на берег; это потребует работ по восстановлению положения опор. Намного опаснее недостаток сил веса. При всплытии одной из оконечностей вследствие возникшего дифферента судопоезд может начать самопроизвольное движение (на данном комплексе тормозная си-

стема у судопоезда отсутствует), что вызовет прогрессирующее нарастание дифферента и, соответственно, скорости движения судопоезда. В результате может произойти авария.



Рис. 2. Нос дока перед посадкой на опоры

Таким образом, в течение всей операции передвижки судопоезда док должен быть прижат к опорам. Вопрос лишь в величине необходимой прижимной силы.

Операция имеет дискретный (поэтапный) характер. Имеется исходное состояние, когда док закреплён у причала и прижат балластом к опорам. По команде начинается движение, судопоезд проходит определённое, заранее установленное расстояние. Это перемещение требует немного времени, что позволяет считать количество балласта неизменным. Затем происходит остановка, производится перебалластировка дока. Подаётся новая команда, судопоезд вновь проходит некоторое расстояние, и процесс повторяется. Таким образом, прижимная нагрузка не может быть меньше, чем требуемое изменение количества балласта на одном этапе передвижки.

В процессе передвижки усилия поджатия дока к опорам должны быть, по возможности, постоянными, если не считать неизбежного их изменения в процессе движения судопоезда. Конкретные этапы передвижки и соответствующее им распределение балласта по отсекам дока должны быть определены инструкцией, специально разработанной применительно к конкретной операции. При отработке технологии проведения операции передвижки движение судопоезда не сопровождается изменением балластировки, но по мере накопления опыта эти две операции могут быть частично совмещены. Важно лишь, чтобы не нарушалось соответствие между положением судопоезда относительно дока и распределение балласта по отсекам.

## 2. Опыт пересадки судна типа ТНТ

Предлагаемая технология проведения доковой операции впервые была опробована в ноябре 2013 г. применительно к судну ТНТ-50.

Как указано выше, сложность состояла в том, что водоизмещение судна порожнём (3183 т) с учётом массы транспортного модуля (222 т), установленных подкреплений стапель-палубы

дока [6] и необходимости приёма балласта для удифферентовки превышало паспортную грузоподъёмность дока. Некоторые опасения вызывали то обстоятельство, что наибольшая длина ТНТ (92,75 м) превышала длину дока по стапель-палубе на 43 %.

Для облегчения судна и упрощения работы с ним предварительно были демонтированы надпалубные конструкции.

Предварительная схема ДОУ и оценка реакций от свешивающихся оконечностей были представлены одной из проектно-конструкторских организаций. Анализ показал, что предложенная конструкция ДОУ не гарантировала выполнение условий прочности, а расчёты выполнены при довольно грубых допущениях. Кроме того, натурные измерения выявили наличие начального прогиба кильевой линии со стрелкой 127 мм, что ввиду больших свесов обеих оконечностей являлось благоприятным фактором с точки зрения прочности концевых опор.

В ходе подготовки к доковой операции нами были выполнены расчёты реакций для исходного варианта ДОУ для случаев отсутствия и наличия начального прогиба по методу пяти моментов [8]. Результаты этих расчётов приведены на рис. 3 и 4. По оси абсцисс отложены расстояния от миделя дока в метрах.

Предложенный проектантом вариант ДОУ характеризуется высокой жёсткостью опорных конструкций. При отсутствии у судна начальной погиби это не представляет опасности. Но с учётом измеренной погиби реакция наиболее нагруженного кильблока достигает 446 т, превышая паспортную грузоподъёмность кильбалки (400 т) более чем на 10 %, а напряжения в корпусе судна достигают 115 МПа, что, хотя и не превышает допускаемой величины, но приближается к ней.

Для повышения безопасности доковой постановки нами было предложено уменьшить несущую способность ДОУ и увеличить его податливость путём укладки брусьев деревянной подушки с промежутками и увеличения высоты подушки, чтобы обеспечить, хотя бы в ограниченных пределах, свободу деформации. Тем самым будет соблюден важный принцип: при случайных перегрузках, вероятность которых никогда нельзя исключать, повреждаться должен самый дешёвый и легко заменяемый (исправляемый) элемент – деревянные брусья.

После внесения этих изменений в конструкцию опор расчёт для судна с общим прогибом дал результаты, показанные на рис. 5 (обозначения те же, что и на рис. 4).

Предложенные изменения позволили уменьшить изгибающий момент на 15 %, а наибольшую реакцию – на 13 %, обеспечив выполнение условий прочности.

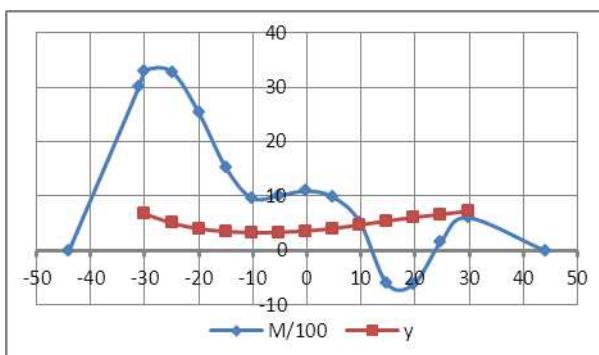


Рис. 3. Изгибающие моменты в корпусе судна (МН·м) и просадки кильблоков (мм) для судна без погиби

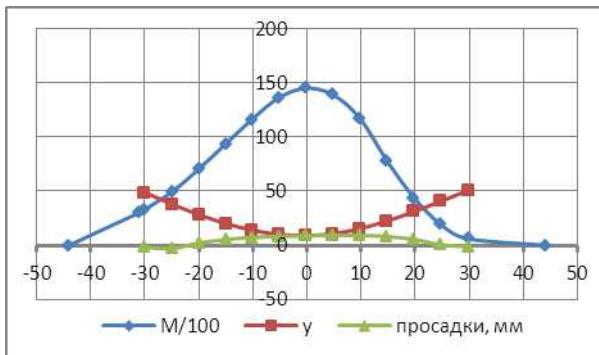


Рис. 4. Изгибающие моменты в корпусе судна (МН·м), прогибы судна ( $y$ ) и просадки кильблоков (мм) для судна с прогибом

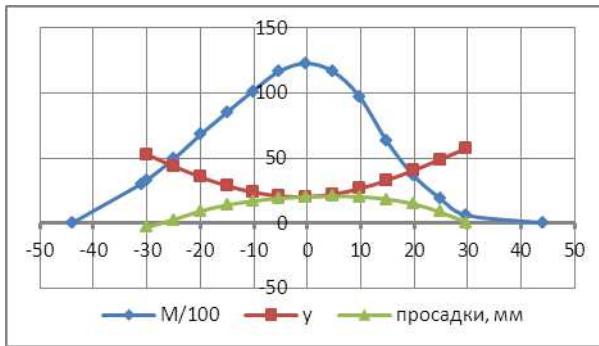


Рис. 5. Результаты перерасчёта реакций ДОУ

На рис. 6 док «Сакура» находится на котловане для погружения с уже поднятым судном и ожидает буксировки к причалу. Общий вид ДОУ показан на рис. 7, а на рис. 8 более детально изображена кормовая опора. При этом кильбалка с деревянными подушками приподнята на тележках. В исходном положении она опирается на центральную подушку, уложенную на палубе эстакады, и на боковые тумбы. Заметим, что нет необходимости устанавливать эти тумбы под каждой кильбалкой, но эта рекомендация не была выполнена.

На рис. 9 показана носовая часть эстакады дока, установленного у причала, а на рис. 10 – носовая оконечность дока с судном.

При проведении доковой операции чрезмерных перегрузок опор не наблюдалось.



Рис. 6. Док с судном на котловане



Рис. 7. ДОУ для ТНТ в процессе подготовки



Рис. 8. Кормовая опора с гидравлической тележкой



Рис. 9. Док установлен у причала



Рис. 10. Носовая оконечность дока с судном

Для предотвращения возможных аварийных ситуаций, о которых было сказано в разделе 2, в результате обсуждения с участием представителей ДальРАО, пункта долговременного хранения радиоактивных отходов, Морской инженерной компании и администрации дока «Сакура» была разработана детальная инструкция по балластировке дока в ходе передвижки.

Особенность рассматриваемой доковой операции, заключавшаяся в том, что опорное устройство занимало всю длину стапель-палубы, благоприятствовала разработке технологии проведения передвижки судна на береговую площадку.

Упомянутая во введении инструкция, разработанная проектантами дока, была неприменима, в первую очередь, по той причине, что предполагала при различной массе объекта длину транспортного модуля постоянной и равной 35 м. Кроме того, она не предусматривала наличие прижимного балласта и была довольно трудна для понимания, поскольку не были чётко определены физические принципы, из которых она исходила.

В основу новой инструкции было заложено простое и наглядное физическое представление. Перед началом операции по передвижке вся палуба эстакады занята тележками в количестве 13 пар, передающими на док нагрузку от судопоезда. Расстояние между осями тележек в большинстве случаев составляет 5 м. Для предотвращения непредвиденного всплытия дока в процессе передвижки или в результате прилива в pontон дока необходимо принять прижимной балласт в количестве 900 т. Исходное распределение балласта по отсекам pontона дока равномерное.

Передвижка должна осуществляться по этапам, на каждом этапе судопоезд передвигается в сторону носа дока на 5 м. При этом на причал переходит одна пара тележек. Удобно считать, что перемещения судопоезда не происходит, а на причал перемещается крайняя (на этом этапе) кормовая пара тележек. Исчезнувшая реакция этих тележек должна компенсироваться весом балласта, принятого в те балластные отсеки, над которыми ранее они располагались. Таким образом, балласт принимается последовательно от кормовых отсеков к носовым. Когда весь судопоезд окажется на берегу, в отсеки дока будет при-

нят балласт, масса которого соответствует массе судопоезда, а положение центра тяжести – таковому для судопоезда, с возможностью небольшого отклонения в ту или иную сторону. Точный расчёт при этом не требуется благодаря запасу прижимного усилия.

Опыт проведения первой операции по перемещению ТНТ на береговую площадку дал положительный результат. Через несколько месяцев подобным же образом была проведена операция с другим однотипным судном.

Порядок балластировки дока при передвижке трёхотсечных блоков несколько отличается от изложенного в связи с тем, что длина ДОУ составляет приблизительно половину длины дока. Хотя и общая продольная, и поперечная прочность дока обеспечиваются, всё же в исходном состоянии для уменьшения изгиба дока желательно при подъёме блока удалять балласт преимущественно из отсеков, расположенных в средней (ближайшей к миделя) части дока, если, конечно, имеется запас грузоподъёмности. Ponton дока разделён по длине на 4 группы отсеков длиной по 15 м, а в районе миделя находится сухой отсек длиной 5 м. На начальных этапах передвижки судопоезд не выходит за пределы дока, поэтому общее количество балласта при перемещении на первые 15 м не должно изменяться, но он должен перекачиваться из носовых отсеков в кормовые.

В зависимости от массогабаритных характеристик перемещаемого объекта, характер балластировки изменяется, что, в целях безопасности проведения доковой операции, должно быть отражено в инструкции, разработанной для каждого типа блоков.

## Заключение

В предлагаемой работе изложены материалы, относящиеся к транспортно-передаточному доку «Сакура». В значительной мере они могут быть использованы при эксплуатации передаточных доков, имеющих другие характеристики. Если гидравлическая система дока отличается от рассмотренной выше, следует принимать во внимание возможность неравномерного распределения реакций тележек судопоезда, что убедительно показано в [4]. Если док имеет большие размерения, необходимо учитывать его гибкость в продольном и поперечном направлениях и положение подводных опор. При значительных прогибах дока ход плунжеров гидродомкратов может оказаться недостаточным для их компенсации, что неизбежно вызовет неконтролируемую перегрузку опор. Чтобы этого избежать, необходимо тщательно прорабатывать вопросы балластировки дока, обращая внимание на возможные неблагоприятные факторы, среди которых погиб кильевой линии судна.

*Работа выполнена при поддержке Программы «Научный фонд» ДВФУ в рамках исполнения обязательств по соглашению № 12-08-13021-21/13.*

### Литература

1. Металлические плавучие доки / Под ред. М.А. Ловягина. Л.– Судостроение, 1964. 336 с.
2. Танхельсон Г.В., Загорская Е.П., Билянский М.Х. Железобетонные плавучие доки. – Л.: Судпромгиз, 1960. 196 с.
3. Козляков В.В., Финкель Г.Н., Хархурим И.Я. Проектирование доковых опорных устройств. – Л.: Судостроение, 1973. 176 с.
4. Топчий В.А. Система передаточный док – судно. – Л.: Судостроение, 1981. 128 с.
5. Краморенко А.В., Мазокин В.А., Смирнов А.Г., Терешкевич О.В., Шмаков Р.А. Постановка реакторных блоков аварийных атомных подводных лодок в береговой пункт изоляции // Судостроение. 2013. № 5. С. 69–72.
6. Антоненко С.В., Линник Е.В., Рыбалкин Ю.Г. Обеспечение эксплуатационной надёжности плавучих доков // Морские интеллектуальные технологии. Спецвыпуск № 2. 2013. С. 4–8.
7. Антоненко С.В. Обеспечение прочности конструкций баржи и слипа при передвижке тяжеловесного груза // Морские интеллектуальные технологии, настоящий выпуск.
8. Справочник по строительной механике корабля. / Бойцов Г.В., Палий О.М., Чувиковский В.С. – В трёх томах. Том 1. Общие понятия. Стержни. Стержневые системы и перекрытия. – Л.: Судостроение, 1982. 376 с.

### References

1. Metallicheskie plavuchie doki. Pod red. M.A. Lovjagina. L.: Sudostroenie, 1964. 336 s.
2. Tanhel'son G.V., Zagorskaja E.P., Biljanskij M.H. Zhelezobetonnye plavuchie doki. L.: Sudpromgiz, 1960. 196 s.
3. Kozljakov V.V., Finkel' G.N., Harhurim I.Ja. Proektirovanie dokovyh opornyh ustrojstv. L.: Sudostroenie, 1973. 176 s.
4. Topchij V.A. Sistema peredatochnyj dok – sudno. L.: Sudostroenie, 1981. 128 s.
5. Kramorenko A.V., Mazokin V.A., Smirnov A.G., Tereshkevich O.V., Shmakov R.A. Postanovka reaktornyh blokov avariynyh atomnyh podvodnyh lodok v beregovoj punkt izoljacii. Sudostroenie. 2013. № 5. S. 69–72.
6. Antonenko S.V., Linnik E.V., Rybalkin Ju.G. Obespechenie jekspluatacionnoj nadjozhnosti plavuchih dokov. Morskie intellektual'nye tehnologii. Specvypusk № 2. 2013. S. 4–8.
7. Antonenko S.V. Obespechenie prochnosti konstrukcij barzhi i slipa pri peredvizhke tjazhelovesnogo gruza. Morskie intellektual'nye tehnologii, nastojashhij vypusk.
8. Spravochnik po stroitel'noj mehanike korablja. Bojcov G.V., Palij O.M., Chuvikovskij V.S. V trjoh tomah. Tom 1. Obshchie ponjatija. Sterzhni. Sterzhnevye sistemy i perekrytiya. L.: Sudostroenie, 1982. 376 s.

УДК 629.12.001.2

## РАБОЧИЙ СТОЛ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ БАЗИРОВАНИЯ И БОЕВОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЦЕЛЕВОЙ ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

**Тенишев Петр Геннадьевич**, аспирант кафедры проектирования судов СПбГМТУ,  
начальник сектора теории корабля и нагрузки масс  
ОАО «НЕВСКОЕ ПКБ», Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: tenisheff@rambler.ru

**Виноградов Данила Николаевич**, аспирант кафедры проектирования судов СПбГМТУ,  
инженер-конструктор 3 категории (сектор общего расположения)  
ОАО «НЕВСКОЕ ПКБ», Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

В данной статье изложены материалы по тематике: Автоматизированное управление авиацией и авиационно-техническими средствами корабля (авианесущие корабли, универсальные десантные корабли (вертолетоносцы)) использующих в составе своего вооружения групповое базирование летательных аппаратов (самолеты, вертолеты), а также автоматизированное управление погрузкой и выгрузкой целевой десантной техники с десантных кораблей (большие десантные корабли, универсальные десантные корабли).

В настоящий момент на кораблях ВМФ России отсутствуют электронно-вычислительные системы позволяющие автоматизировать процессы управления связанные с эксплуатацией целевой военной техники (самолеты, вертолеты, десантная спец. техника). Концепция заложенная в основе данной работы позволит создать научно-технический задел направленный на оптимизацию средств автоматизированного управления кораблем, который бы позволил развивать как основные так и смежные области науки и промышленности, обеспечив при этом компенсацию отставания отечественного военно-промышленного комплекса по данной тематике, а по отдельным вопросам позволил бы даже заложить опережение по данной тематике мировых лидеров данных разработок (страны блока НАТО).

**Ключевые слова:** рабочий стол информационной поддержки старшего инженера полетов. Автоматизированный рабочий стол информационной поддержки комплексного базирования и боевого применения корабельных летательных аппаратов с авианесущих и универсальных десантных кораблей. Автоматизированный рабочий стол базирования и боевого применения целевой военной техники. Единая интегральная вычислительная платформа автоматизированной системы управления. Доска «Уиджи». Aircraft Data Management and Control System (ADMACS, рус. система обработки данных и управления самолётами).

## DESK INFORMATION SUPPORT OF BASING AND COMBAT APPLICATION OF THE TARGET OF MILITARY EQUIPMENT

**Tenisheff Petr Gennadyevich**, Postgraduate student of the Department of designing of the  
courts of Saint-Petersburg SMTU,  
head of the sector of the "Theory of the ship and the load of the masses"  
JSC "Nevskoye design Bureau", Sankt-Petersburg, Russia  
E-mail: tenisheff@rambler.ru

**Vinogradov Danil Nikolayevich**, Postgraduate student of the Department of designing of the  
courts of Saint-Petersburg SMTU, engineer constructor 3 categories  
JSC "Nevskoye design Bureau", Sankt-Petersburg, Russia

### ABSTRACT

In this article, the materials on the themes: Automated management of aviation and the aviation of ship equipment (aircraft carrying ships, amphibious assault vehicles (helicopter carrier)) uses as part of its armament group basing of flying machines (planes, helicopters), as well as automatic control of loading and discharge target airborne equipment with tank landing ships (large amphibious ships, amphibious assault ships).

At the moment the ships of the Navy of Russia no electronic computer system will allow automation of management processes connected with the operation targeted military vehicles (aircraft, helicopters,

landing spec. technique). Concept lies in the basis of this work will allow to create scientific and technological developments aimed at optimization of computer-aided control of the ship, which would have allowed to develop both basic and related areas of science and industry, while ensuring compensation backlog of domestic military-industrial complex on the subject, and on specific issues would even lay ahead on the subject of world leaders of these developments (NATO countries).

**Key words:** desk information support for senior engineer of the flight. Automated Desk of information support of integrated home and combat use of shipborne aircraft from aircraft carriers and amphibious assault ships. Automated Desk-based and combat application of the target of military equipment. A single integrated computing platform of the automated control system. Board "Ouija". Aircraft Data Management and Control System (ADMACS, the system data and control planes).

## Введение

Подготовка и управление взлетно-посадочными операциями с авианесущего корабля, равно как и выполнение операций по эксплуатации целевой десантной техники с десантного корабля и универсального десантного корабля представляет собой сложную и трудоемкую техническую задачу с трудно-прогнозируемым ходом развития событий в процессе эксплуатации.

При решении данной задачи необходимо обеспечить четкую организацию с явной и наглядной структурой взаимосвязей, обеспечивающей безотказную координацию всех физических объектов, а также работу служб, задействованных в данном процессе.

В качестве средств технической поддержки используются так называемые рабочие столы информационной поддержки.

На сегодняшний день разработан такой стол для старшего инженера полетов для корабля пр. 11430.

Он представляет собой функциональное изделие на основе макета, в данном случае, полетной палубы и ангара с унифицированной системой ручных условных обозначений, макетами летательных аппаратов и специальной техники (рис. 1).

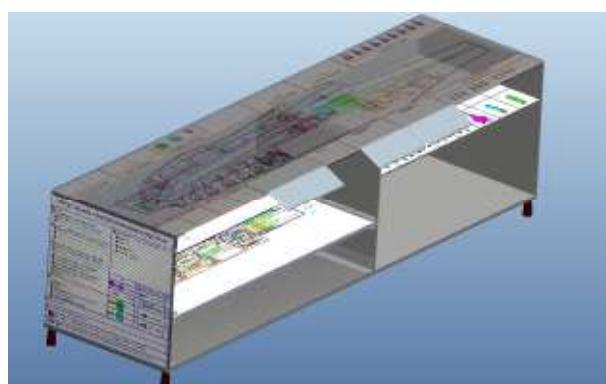


Рис. 1.

На сегодняшний момент задачи по координации и управлению взлетно-посадочными операциями на отечественном и экспортном авианесущих кораблях решаются путем выполнения инструкций и ведением соответствующих журналов учета на основе бумажных носителей. Это весьма трудоемко и малоэффективно, так как данный

подход не дает возможности полностью раскрыть возможности рабочего стола информационной поддержки.

## 1. Перспективный рабочий стол информационной поддержки для авианесущего корабля

Повышение эффективности работы рабочего стола можно получить за счет его компьютеризации. Такой рабочий стол представляет собой комплексное программно-аппаратное решение на основе ЭВМ, и программного обеспечения включающего в себя единую специализированную базу данных и знаний с возможностью ввода/вывода информации, посредством сенсорной панели.

Существует возможность, ряд информационных панелей, рабочего стола информационной поддержки в макетном исполнении, изготовить с применением планшетных компьютеров.

С помощью компьютеризированного рабочего стола можно решать следующие задачи информационной поддержки:

1. Расчет воздушного потока на основе векторного сложения скоростей (рис. 2).

2. Учет времени ЛАК в полете на основе совокупности независимых таймеров/счетчиков времени для полной возможной номенклатуры ЛАК на корабле (рис. 3).

3. На базе планшетных компьютеров могут выводиться видеокадры полетной палубы и ангаря и тому подобная информация с камер слежения (рис. 4).

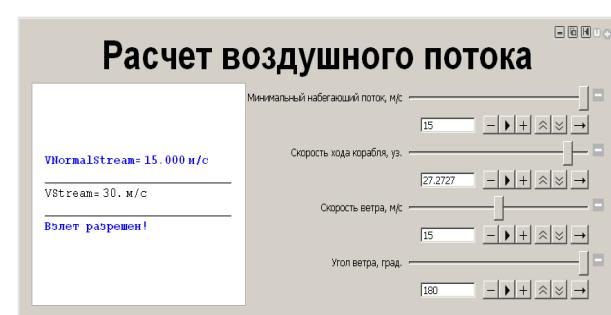


Рис. 2.

## УЧЕТ ВРЕМЕНИ ЭСКАДРИЛЬИ ЛАК В ПОЛЕТЕ

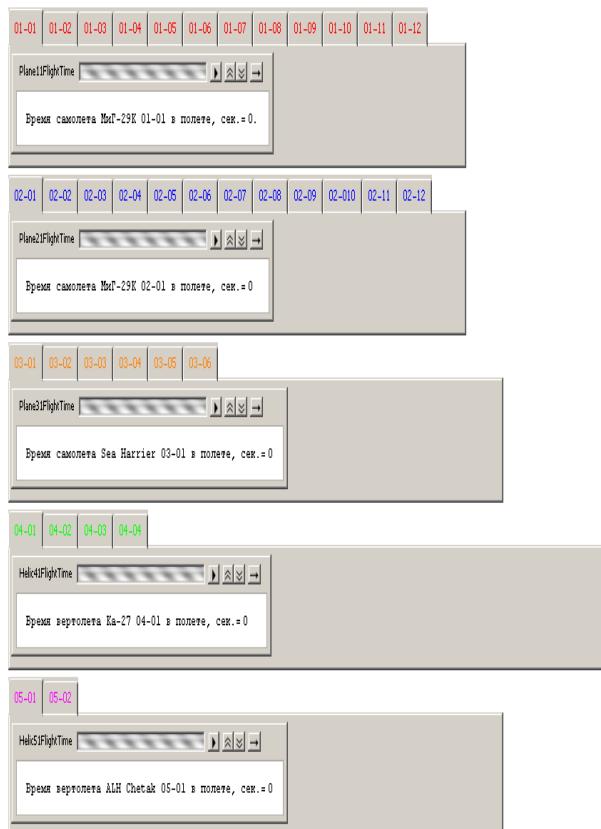


Рис. 3.



Рис. 4.

С применением планшетных компьютеров также появляется возможность по обмену данными между ними посредством беспроводных сетей, как между собой, так и между любыми другими системами корабля, которые возможно используют, или могут использовать, в своей работе беспроводные сети.

### 2. Реализация

На всех действующих авианосцах ВМС США (данные о эксплуатации аналогичных изделий на десантных корабля или НИТКА ВМС США отсутствуют) активно применяются, как рабочие столы

(в США – «доски») первого поколения (рис. 5), так и одновременно происходит планомерный переход на их электронные аналоги.

Таким образом, прослеживается тенденция по всеобщему компьютеризированию и унификации данного сегмента автоматизированной системы управления (АСУ) корабля.



Рис. 5.

На основе открытых данных можно сделать вывод, что применяемые на сегодняшний день прототипы электронно-вычислительных систем средств информационной поддержки применяемые ВМС США, выполняют переход от макетного исполнения рабочего стола информационной поддержки к его электронному прототипу, не являясь при этом единой системой учета, контроля и логистической поддержки систем и средств авианесущего корабля.

Основные положения, изложенные в настоящем техническом предложении, либо не рассматривались ВМС США либо имеют «закрытый» характер.

При любом из перечисленных вариантов развития событий, существует острая необходимость, вести отечественные проработки данной тематики для ВМФ России, силами, как КБ-проектанта в данном случае ОАО «Невское ПКБ», так и силами всей кораблестроительной отрасли в целом.

Разработка компьютеризированного стола информационной поддержки позволит применить найденные принципы для построения и ведения в реальном времени планов-графиков любых работ связанных с обеспечением процесса эксплуатации и обслуживания других подсистем корабля.

К таким подсистемам относятся:

1. Энергетическая система. Возможен контроль работы главного двигателя, нагрузок при работе главного двигателя, обеспечение рабочими средами такими как топливо, пар, электроэнергия, обеспечение контроля параметров таких как обороты, мощность, скорость хода, нагрузки на котлы и другие.

В случае применения ядерной установки данный подход позволил бы решать все вопросы

связанные с ее контролем, управлением и обслуживанием.

2. Системы перекачки рабочих сред, маршруты движения рабочих сред в трубопроводах систем, как при перекачке, так и при приеме и расходовании, контроль уровней рабочих сред в цистернах и ряд других.

3. Электро-энергетическая система – схемы работы трасс, узлов, щитов, электроприборов, контроль целостности работы электрических контуров и другие.

4. Средства контроля перемещений личного состава (индивидуальные GPS-брелки) – член экипажа на вахте на отдыхе, работы выполняемые личным составом, формирования индивидуальных план-графиков работ, планирование, выдача заданий, контроль их исполнения.

Примеры информации, выводимой на стол информационной поддержки показаны на рис. 6

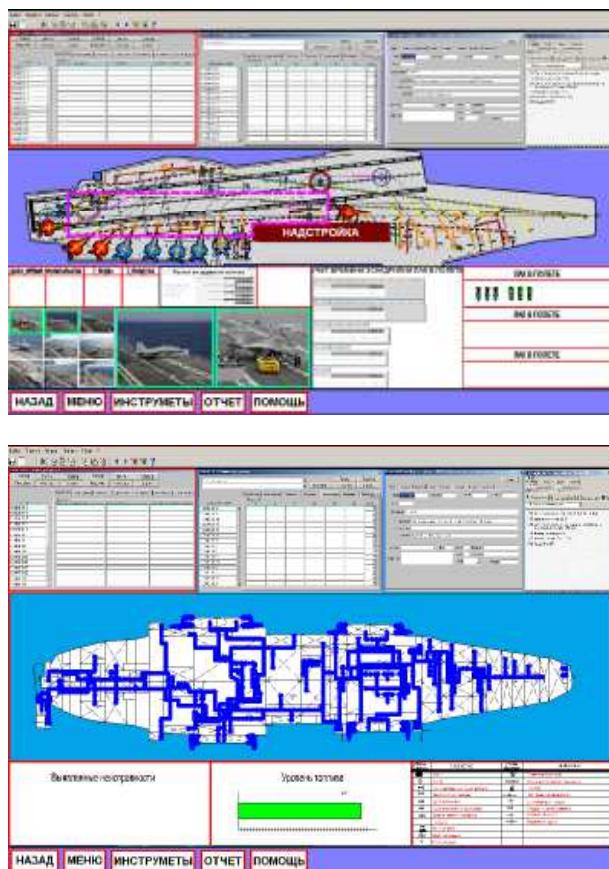


Рис. 6.

С применением голограмических проекторов появится возможность, при необходимости, в целях визуализации, какие-либо объекты выводить в трехмерном изображении, с возможно-

стью, в том числе, выбора необходимого ракурса обзора.

Аналогично выводу информации и ввод параметров управления может производиться, как с помощью сенсорной панели, так и с помощью голограммических изображений. На сегодняшний день современные технические средства для решения данной задачи уже существуют.

На вопросе логистики, то есть логистической информационной поддержке следует сделать особый акцент и рассматривать постановку логистической задачи как основную при проектировании программно-вычислительных средств рабочего стола.

Для постановки логистической задачи авианосца, на данном этапе, предлагается рассмотреть совокупную модель – сбытовой, транспортной логистики, а также логистики запасов.

С точки зрения логистики, авианосец возможно рассматривать как локальную структуру (объединение/предприятие) включающую в свой состав:

- склад товаров, то есть боезапас, топливо ЛАК и другие;

- развитая структура обслуживающего персонала – личный состав корабля, личный состав авиакрыла;

- собственный парк транспорта различного типа и назначения - ЛАК;

- системы обслуживания транспортного парка то есть зоны тех. обслуживания, посты заправки рабочими средами, подъемники ЛАК, подъемники боезапаса, технический персонал обслуживания и ремонта ЛАК.

Таким образом, авианосец в разделе логистической постановки задачи, предлагается рассматривать как чисто утилитарный логистический объект аналогично объединению или предприятию, то есть склад товаров и услуг с возможностью прямой доставки до «потребителя».

## Заключение

Базовыми принципами разработки стола информационной поддержки авианесущего корабля должны стать:

4.1. Единая архитектура, структура и монопрограммная реализация баз данных и баз знаний.

4.2. Комплексное программно-аппаратное-вычислительное решение.

4.3. Комплексное решение по унификации средств ввода/вывода информации и унификации элементов интерфейса.

4.4. Ключевые принципы разработки программного обеспечения должны строится на основе методов теории оптимизации и теории логистики.

## Литература

1. Шинкоренко Д. План строительства и модернизации авианосцев // Зарубежное военное обозрение. № 8. 2012. С. 77.
2. Jeffrey S. Johnston, Lieutenant, USN, AFIT/GAE/ENY/09-M12, DEPARTMENT OF THE AIR FORCE, AIR UNIVERSITY, AIR FORCE INSTITUTE OF TECHNOLOGY Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, A Feasibility Study of a Persistent Monitoring System for the Flight Deck of U.S. Navy Aircraft Carriers.

**References**

1. Shinkorenko D. Plan stroitel'stva i modernizatsii avianostsev. Zarubezhnoe voennoe obozrenie. № 8. 2012. S. 77.
2. Jeffrey S. Johnston, Lieutenant, USN, AFIT/GAE/ENY/09-M12, DEPARTMENT OF THE AIR FORCE, AIR UNIVERSITY, AIR FORCE INSTITUTE OF TECHNOLOGY Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, A Feasibility Study of a Persistent Monitoring System for the Flight Deck of U.S. Navy Aircraft Carriers.

## **Теория корабля и строительная механика**

УДК 626.01

### **УСТОЙЧИВОСТЬ ПОДПОРНОГО СООРУЖЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ТИПА НА ПОДАТЛИВОМ ОСНОВАНИИ**

**Мамонтов Андрей Игоревич**, кандидат технических наук,  
доцент кафедры кораблестроения и океанотехники  
Дальневосточный федеральный университет, Инженерная школа,  
Владивосток, Россия  
E-mail: Andrew.Mamontov@outlook.com

**Цимбельман Никита Яковлевич**, кандидат технических наук,  
заведующий кафедрой Гидротехники, теории зданий и сооружений  
Дальневосточный федеральный университет, Инженерная школа,  
Владивосток, Россия  
E-mail: nikzimb@mail.ru

**Чернова Татьяна Игоревна**, Университет Дэйтона, Инженерная школа  
США, штат Огайо, город Дэйтон  
E-mail: ch\_t\_i@mail.ru

#### **АННОТАЦИЯ**

Одним из направлений гидротехнического строительства является возведение сооружений, конструкция которых представляет собой оболочку, заполненную грунтом [1]. Преимущество такого типа сооружений использование минимального количества нового материала, т.к., в основном, сооружение состоит из грунта, взятого непосредственно на месте строительства.

Под устойчивостью сооружения в этом исследовании понимается возможность противостоять внешней горизонтальной нагрузке под действием сил собственного веса без переворота.

Целью данного исследования является разработка теоретической модели для прогнозирования реакции сооружения на горизонтальную нагрузку с учётом собственного веса, и проверка теории на конечно-элементной модели.

Воздействие, которое может быть смоделировано этой горизонтальной нагрузкой лёд, боковое давление грунта, навал судна, швартовые усилия, технологическая нагрузка.

Теоретическая модель разработана посредством использования линий скольжения теории пластичности и основана на простых уравнениях статического равновесия.

Конечно-элементная модель создана с помощью программного обеспечения ANSYS / LS-Dyna [2] для проверки теоретической модели.

Максимальная горизонтальная нагрузка, ведущая к опрокидыванию оболочки, далее по тексту называется «MaxFice», рассчитывается на основании теоретической модели, а затем подтверждается численным моделированием. Результаты численного моделирования коррелируют с результатами теоретической модели. Показано расхождение между теоретическими и числовыми результатами. Обсуждаются возможные причины расхождений. Исследование помогает обеспечить хорошее понимание механизма опрокидывания, полезно для развития теоретических моделей и целей проектирования.

**Ключевые слова:** грунт основания, ледовая нагрузка, устойчивость, поле скольжения, Кулон-Мор, сцепление грунта, ANSYS / LS-Dyna.

### **STABILITY OF RETAINING WALL OF GRAVITATIONAL TYPE ON THE COMPRESSIVE BEDDING SOIL**

**Mamontov Andrew Igorevich, PhD.**

The Associate Professor of Shipbuilding and Ocean Engineering Faculty of School of Engineering of Far Federal University  
Far Eastern Federal University, School of Engineering  
Vladivostok, Russia  
E-mail: Andrew.Mamontov@outlook.com

**Tsimbelman Nikita Yakovlevich**, PhD, Associate Professor,  
 Head of Offshore & Structural Engineering dept.  
 Far Eastern Federal University, School of Engineering  
 Vladivostok, Russia  
 E-mail: nikzimb@mail.ru

**Chernova Tatiana Igorevna**, University of Dayton, School of Engineering  
 Dayton, Ohio, USA  
 E-mail: ch\_t\_i@mail.ru

## ABSTRACTS

One of the areas of hydraulic engineering is the construction of facilities, which is a shell filled with soil. The advantage of this type of constructions is to use minimum of new material. That construction mainly consists of soil taken directly at the building site.

Sustainability of the construction means the ability to resist to external horizontal load under the action of its own weight without overturning.

The purpose of this study is to develop a theoretical model to predict the construction response for the horizontal load, taking into account construction own weight, and the verification of the theoretical model by finite elemental model. Lateral pressure of soil, berthing impact, mooring forces, technological capacity can be modelled by this horizontal load.

The finite element model was created using the software ANSYS / LS-Dyna to verify the theoretical model.

A theoretical model is developed through the using of slip lines at the theory of plasticity and is based on simple equations of static equilibrium.

Maximum horizontal load, leading to overturning of the shell, hereinafter is called «MaxFice», is calculated on the basis of the theoretical model and then is confirmed by numerical simulation. The results of the numerical simulation are correlated with the results of the theoretical model. The discrepancy between the theoretical and numerical results is shown. The possible causes of discrepancies are discussed. The study helps to provide a good understanding of the mechanism of the overturning, it is useful for the theoretical models development and design purposes.

**Key words:** foundation soil, ice load, stability, slip field, Coulomb –Mohr, cohesion of soil, ANSYS/LS-Dyna software.

## Введение

Заполненная грунтом стальная оболочка, дала по тексту «сооружение», представляет собой сварную прямоугольная призму, которая сделана из прямоугольных стальных листов и системой внутренних связей из металлопроката. Конструктивная прочность сооружения и жесткость обеспечиваются путем заполнения оболочки грунтом. Стальные листы обеспечивают удержание почвы, обеспечивая вклад в прочность и жесткость сооружения.

Коэффициент использования стального материала при работе конструкции достигает высоких значений, т.к. листы работают в основном на растяжение при удержании грунта.

Сооружения такого типа находят применение для решения многих задач промышленного, гражданского, гидротехнического и транспортного строительства: создание береговых линий, набережных, пирсов, причалов, защитные сооружения в гидротехническом и шельфовом строительстве и т.п.

Задачу сохранения эксплуатационных качеств указанного сооружения можно условно разделить на две: проблема прочности оболочки с грунтом, и проблема её устойчивости на грунте основания.

Т.к. оболочка может заполняться грунтом с повышенными несущими свойствами, чему частично способствуют фильтрующие свойства

грунта в этом исследовании считается, что прочность оболочки заранее обеспечена. Ниже рассмотрим проблему устойчивости сооружения на грунте на опрокидывание.

С точки зрения механики, устойчивость сооружения обеспечивается восстановливающим моментом, возникающим в результате действия собственных гравитационных нагрузок. Опрокидывающий момент возникает при действии горизонтальной боковой силы и горизонтальной реакции основания. Максимальная устойчивость достигается, если грунтовое основание имеет максимальную несущую способность, а пятно контакта имеет минимальную протяжённость. В этом случае, при опрокидывании пятно контакта занимает крайнее боковое положение, обеспечивая максимальное плечо восстановливающего момента.

Если грунт основания более мягкий, то пятно контакта имеет большую протяжённость. Результатирующая сила смещается к центру тяжести сооружения, а плечо восстановливающего момента уменьшается.

Несущая способность грунта основания может быть оценена на основании теории пластичности, учитывающей образование полей скольжения. Описание свойств грунта выполняется на основе модели Кулона-Мора.

## 1. Теоретическая модель

В статье разрабатывается зависимость, определяющая максимальную горизонтальную силу, ведущую к опрокидыванию сооружения, которая представляет собой функцию от нескольких переменных: размеров сооружения, характеристик грунта основания с учётом выбранной модели материала Кулона-Мора.

В качестве материала грунта основания были приняты нормально уплотнённые глины, которые могут встречаться в прибрежной зоне Охотского и Японского морей. Грунт был смоделирован как линейно-упругой, идеально пластичный материал, отвечающий критерию Мора-Кулона, с углом внутреннего трения 30 градусов (ниже в формулах «internal friction angle») и сцеплением (ниже в формулах «coherence») 10 и 30 кПа.

$$\text{internal\_friction\_angle} = 30^\circ,$$

$$\rho = \frac{\text{internal\_friction\_angle} \cdot \pi}{180}$$

Рассматривается работа грунтового основания в пластической стадии. Когда давление на грунт достигает предельного значения, в материале развиваются области скольжения. Предельная нагрузка, в этом случае, определяется по формуле [3]:

$$p = \text{cohesion} \cdot \cot(\rho) \cdot \frac{1 + \sin(\rho)}{1 - \sin(\rho)} \cdot \exp(\pi \cdot \tan(\rho))$$

Удельный вес грунта основания равен

$$Cs = 1.5 \cdot 10^4 \text{ H/m}^3$$

Размеры конструкции: длина основания и высота равны, соответственно равны, см. рис. 1:

$$\begin{aligned} L &= 10 \text{ м}, \\ H &= 15 \text{ м}. \end{aligned}$$

Результирующий вектор гравитационной нагрузки равен:

$$G = Cs \cdot L \cdot H.$$

Расчётная схема сооружения, находящегося в состоянии статического равновесия с полями скольжения, развивающимися в грунтовом основании, показана на рис. 1.

Определить точную конфигурацию эпюры распределения давления в пятне контакта достаточно сложно, особенно в области больших деформаций, поэтому для получения взаимосвязи между действующими силами было сделано упрощение.

Предполагается, что результирующая сила реакции давления на грунт располагается на середине пятна контакта. Тогда, уравнение равновесия можно записать в форме, из которой сразу следует длина пятна контакта  $\ell$ , м:

$$\ell = \frac{G}{p}.$$

Горизонтальная сила, действующая на сооружение, определяет опрокидывающий момент  $M_2$ , который уравновешивается восстановливающим моментом  $M_1$ , возникающим в результате действия сил собственного веса. Для обеспечения стабильного состояния сооружения, восстановления момента  $M_1$  должен быть больше опрокидывающего  $M_2$  (по «методике единого коэффициента запаса» может быть больше в 1.1 раза). Равенство этих двух моментов определяет максимальную горизонтальную нагрузку, превышение которой ведёт к опрокидыванию сооружения. После достижения  $\text{MaxFice}$ , сооружение не способно восстановить исходное положение, т.к. центр тяжести переходит за точку расположения результирующей силы реакции давления на грунт. Это означает, что устойчивость сооружения потеряна.

Опрокидывающий момент  $M_2$  равен произведению максимальной горизонтальной силы «MaxFice» на плечо, которым является расстояние от подошвы до уровня приложения горизонтальной нагрузки. В этом исследовании осадка сооружения принята 9.375м.

Восстановливающий момент  $M_1$  равен произведению результирующей гравитационной силы сооружения  $G$  на плечо равное полу-разности длины сооружения и пятна контакта  $\frac{(L-\ell)}{2}$ .

Уравнение равенства моментов:  $M_1=M_2$ , или

$$G \cdot \frac{(L-\ell)}{2} = \text{draught} \cdot \text{MaxFice}.$$

На основании этого, максимальная горизонтальная сила «MaxFice» определяется в соответствии с формулой:

$$\text{MaxFice} = \frac{-Cs \cdot L^2 \cdot H}{2 \cdot \text{draught}} \cdot \left( \frac{Cs \cdot H}{\text{cohesion} \cdot \cot(\rho) \cdot \exp(\pi \cdot \tan(\rho))} \cdot \left( \frac{1 - \sin(\rho)}{1 + \sin(\rho)} - 1 \right) \right). \quad (1)$$

Формула (1) представляет собой теоретическую модель, функционально связывающую параметры грунта основания и размеры сооружения с максимальной горизонтальной силой «MaxFice», которую сооружение выдерживает без опрокидывания.

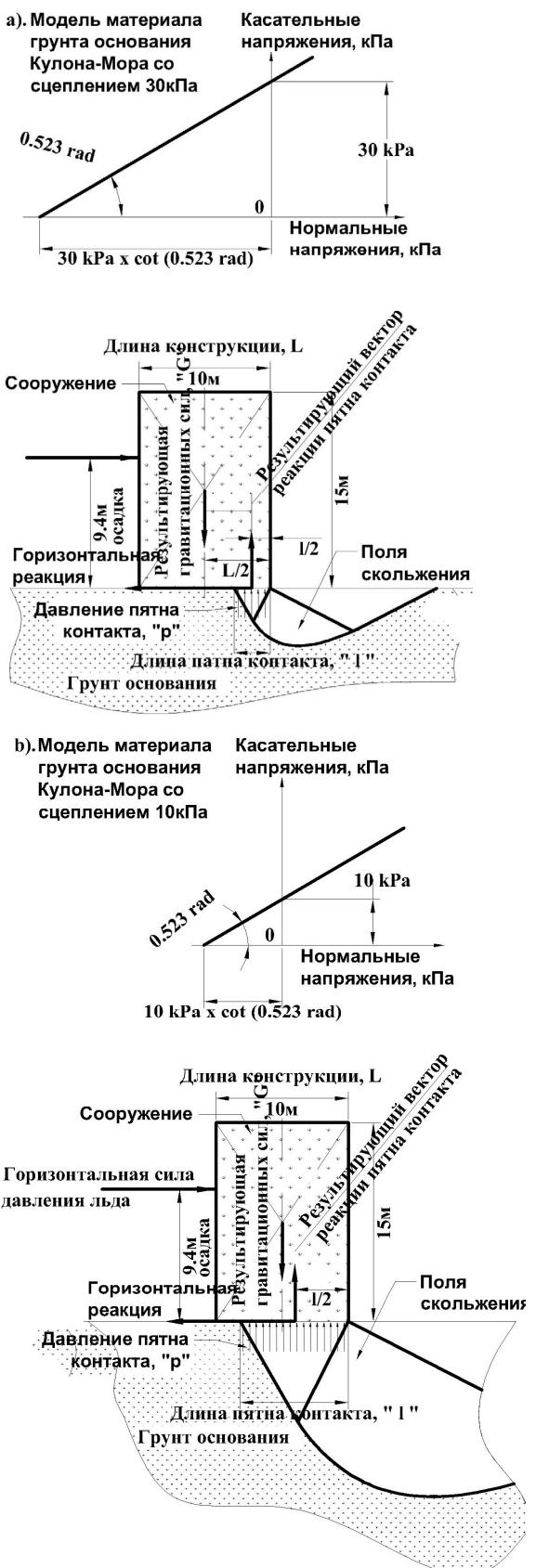


Рис. 1. Модель материала Кулона-Мора и расчетная схема сооружения:  
 а) модель материала Кулона-Мора с сцеплением 30кПа, ниже представлена расчётная схема;  
 б) модель материала Кулона-Мора с сцеплением 10кПа и расчётная схема

## 2. Численный расчет

Краткое описание основных положений моделирования сооружения дано выше. Ниже кратко приводятся основные процедуры и подчеркиваются только те моменты, которые имеют отношение к численной модели.

Численная модель для моделирования опрокидывания сооружения на грунте основания создана в целях проверки зависимости (1) и изучения влияния различных параметров модели грунта на максимальную горизонтальную нагрузку. Численная модель включает упругие элементы оболочки для моделирования стальных листов (тип материала 001 в LS-Dyna) и объёмные элементы для реализации модели почвы, тип материала Друкера-Прагер №193 в LS-Dyna. Показан красными и синими элементами на рис. 2.

Численное моделирование выполняется с помощью программного обеспечения ANSYS / LS - DYN [2].

Основной ожидаемый эффект в материале грунта основания – это переход упругого состояния в состояние текучести. Самая простая модель материала, которая используется для достижения этого эффекта – это обобщенная модель Мора-Кулона [4, 5].

Модель Мора-Кулона основана на постоянных материала, таких как сила сцепления и угол трения, см. рис. 1. Дальнейшее совершенствование этой модели необходимо в ситуациях, связанных со значительными давлениями для достижения верхней границы прочности [6, 7, 8].

Параметры модели материала грунта следующие:

Удельный вес	$1.5 \frac{\text{т}}{\text{м}^3}$ .
Модуль упругости	$6.153 \cdot 10^3$ кПа
Коэффициент Пуассона	0.3.
Угол трения	$30^\circ$ град.
Сцепление	30 кПа и 10 кПа.

Параметры модели материала внутри стальной оболочки аналогичны, за исключением следующих:

Модуль упругости	$8.846 \cdot 10^4$ кПа.
Сцепление	30 кПа.

Параметры модели материала стальной оболочки следующие:

Плотность	$7.8 \frac{\text{т}}{\text{м}^3}$ .
Модуль упругости	$2 \cdot 10^5$ МПа.
Коэффициент Пуассона	0.3.

В численном моделировании гравитационная нагрузка увеличивается от нуля до значения, определяемого плотностью, в диапазоне времени от нуля до десяти секунд, после этого остается постоянной, как показано на рис. 3.

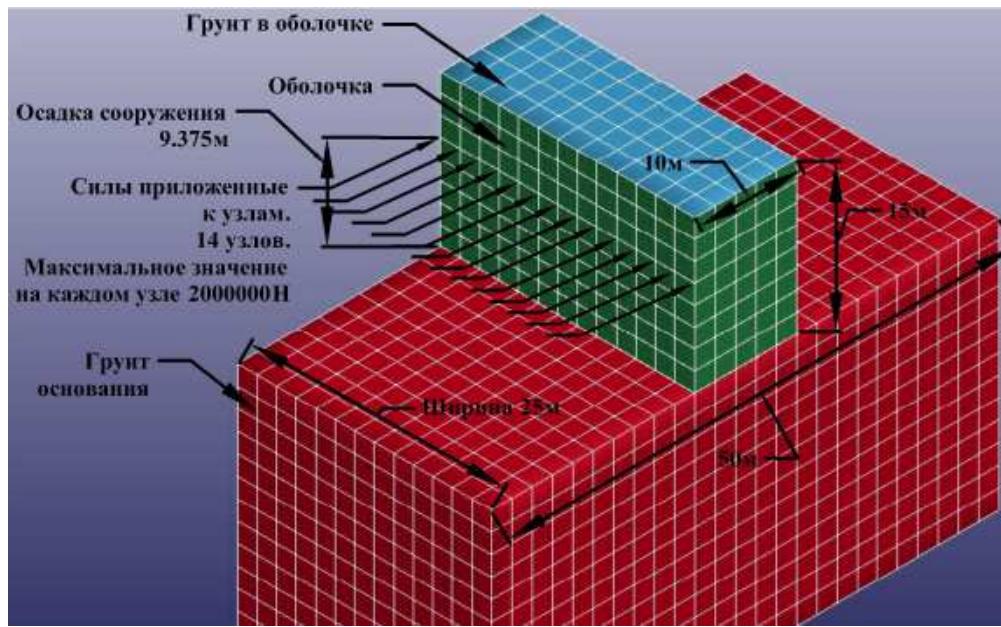


Рис. 2. Конечно-элементная модель.  
Красный цвет – грунт основания, синий цвет – грунт в оболочке, зелёный оболочка



Рис. 3. Зависимость гравитационной нагрузки (левая ось) и горизонтальной силы (правая ось) от времени

Горизонтальная нагрузка, распределяется на каждый из 14 узлов, моделируя действие льда на единицу длины, увеличивается с нуля до  $2 \cdot 10^6$  Н в диапазоне от 50 до 130сек, после этого остаётся постоянной. Значение  $2 \cdot 10^6$  Н принято таким для того, чтобы несколько превысить расчётную максимальную силу, ведущую к опрокидыванию сооружения.

По формуле (1) рассчитывается максимальная горизонтальная нагрузка « MaxFice », действующая на сооружение и вызывающая его поворот. Значения получаются путём подстановки числовых значений в формулу (1), см. уравнения

(2) и (4) в табл., для случая 10 кПа и 30 кПа сцепления грунта основания.

Полученные значения умножаются на ширину сооружения 25м и делятся на количество узлов 14 в направлении ширины, т.е.  $\text{MaxFice} \cdot \frac{25}{14}$ . Эти значения отмечены на графиках возрастания нагрузки рис. 3. Для пересчёта на значение программного времени применялась линейная интерполяция, см. уравнения (3) и (5).

Фиксация момента опрокидывания сооружения в численном моделировании производится путём записи перемещений верхних узлов и анализа полученного графика. См. рис. 5. Момент резкого возрастания перемещений соответствует моменту опрокидывания сооружения.

В численном моделировании достигнуты и зафиксированы на оси программного времени на рис. 5 два момента переворота сооружения, соответствующие моментам времени, рассчитанным в соответствии с (3) и (5). Поведение сооружения в момент потери устойчивости зафиксировано на рис. 4.

Таким образом, моделирование показало, что история перемещения верхней части блока, на который действует собственная сила тяжести и внешняя горизонтальная нагрузка, существенно зависит от сцепления грунта основания. Рис. 5 иллюстрирует влияние изменения сцепления грунта основания на динамику сооружения.

По графикам рис. 5 видно, что уменьшение сцепления грунта основания с 30 кПа до 10 кПа приводит к смещению графика зависимости перемещения верхней части сооружения, которое является реакцией на воздействие внешней горизонтальной нагрузки. В этом исследовании было установлено, что снижение сцепления грунта основания в три раза уменьшает максимальную горизонтальную нагрузку, ведущую к опрокидыванию сооружения, почти пропорционально.

## Результаты

Графики перемещений демонстрируют асимптотическое поведение при нагружении. Положение асимптот на оси программного времени фиксируют моменты опрокидывания сооружения.

Зависимости перемещений одного из верхних узлов (№5674) сооружения показаны на рис. 5. Результаты расчёта максимальной горизонтальной нагрузки по формулам (1), (2) и (5) для 10 кПа и 30 кПа сцепления грунта основания, отмечены двумя выносками на этом рис.

Как видно, результаты расчёта по формулам (1), (2) и (5) достаточно хорошо согласуются с результатами численного моделирования (расхождение до 10%), особенно если учесть тот факт, что движение сооружения происходит в области больших деформаций, которые искажают первоначальную геометрию системы.

Расчёт в области больших деформаций позволяет имитировать наклон сооружения, при увеличении глубины проникновения сооружения в грунт в результате действия горизонтальной нагрузки и силы тяжести. Увеличение глубины проникновения происходит потому, что снижение сцепления грунта в модели материала основания приводит к уменьшению несущей способности на единицу длины и, следовательно, большая длина пятна контакта сооружения с увеличением угла наклона требуется для удержания сооружения в состоянии равновесия.

Графики рис. 5 показывают, что теоретический результат для 10 кПа даёт несколько меньшее значение опрокидывающей силы. В численном моделировании опрокидывание сооружения происходит при большей горизонтальной силе. Это объясняется тем, что численная модель не учитывает разрывы, которые неизбежны в грунте

основания при определённом уровне пластических деформаций.

Ниже приводятся примеры расчёта по формуле (1) для Сцепление = 30кПа и 10кПа.

Сцепление = 30кПа:

$$\text{MaxFice} = \frac{-Cs \cdot L^2 \cdot H}{2 \cdot \text{draught}} \cdot \left( \frac{\frac{Cs \cdot H}{\text{cohesion} \cdot \cot(\rho) \cdot \exp(\pi \cdot \tan(\rho))}}{\frac{1 - \sin(\rho)}{1 + \sin(\rho)} - 1} \right) = \\ = \frac{-1500 \cdot 10^2 \cdot 15}{2 \cdot 9.375} \cdot \left( \frac{\frac{15000 \cdot 15}{30000 \cdot \cot(0.523) \cdot \exp(\pi \cdot \tan(0.523))}}{\frac{1 - \sin(0.523)}{1 + \sin(0.523)} - 1} \right) = \\ = 9.17 \cdot 10^5 \text{ N.}$$

На каждый из 14 узлов

$$\text{MaxFice} \cdot \frac{25}{14} = 1.91 \cdot 10^6 \text{ N} \quad (2)$$

В масштабе времени

$$9.17 \cdot 10^5 \cdot \frac{25}{14} \cdot \frac{80}{20 \cdot 10^5} = 116 \text{ c} \quad (3)$$

Сцепление = 10кПа

$$\text{MaxFice} = \frac{-Cs \cdot L^2 \cdot H}{2 \cdot \text{draught}} \cdot \left( \frac{\frac{Cs \cdot H}{\text{cohesion} \cdot \cot(\rho) \cdot \exp(\pi \cdot \tan(\rho))}}{\frac{1 - \sin(\rho)}{1 + \sin(\rho)} - 1} \right) = \\ = \frac{-1500 \cdot 10^2 \cdot 15}{2 \cdot 9.375} \cdot \left( \frac{\frac{15000 \cdot 15}{10000 \cdot \cot(0.523) \cdot \exp(\pi \cdot \tan(0.523))}}{\frac{1 - \sin(0.523)}{1 + \sin(0.523)} - 1} \right) = \\ = 3.51 \cdot 10^5 \text{ N.}$$

На каждый из 14 узлов

$$\text{MaxFice} \cdot \frac{25}{14} = 3.51 \cdot 10^5 \text{ N} \quad (4)$$

В масштабе времени

$$3.51 \cdot 10^5 \cdot \frac{25}{14} \cdot \frac{80}{20 \cdot 10^5} = 75.1 \text{ c} \quad (5)$$

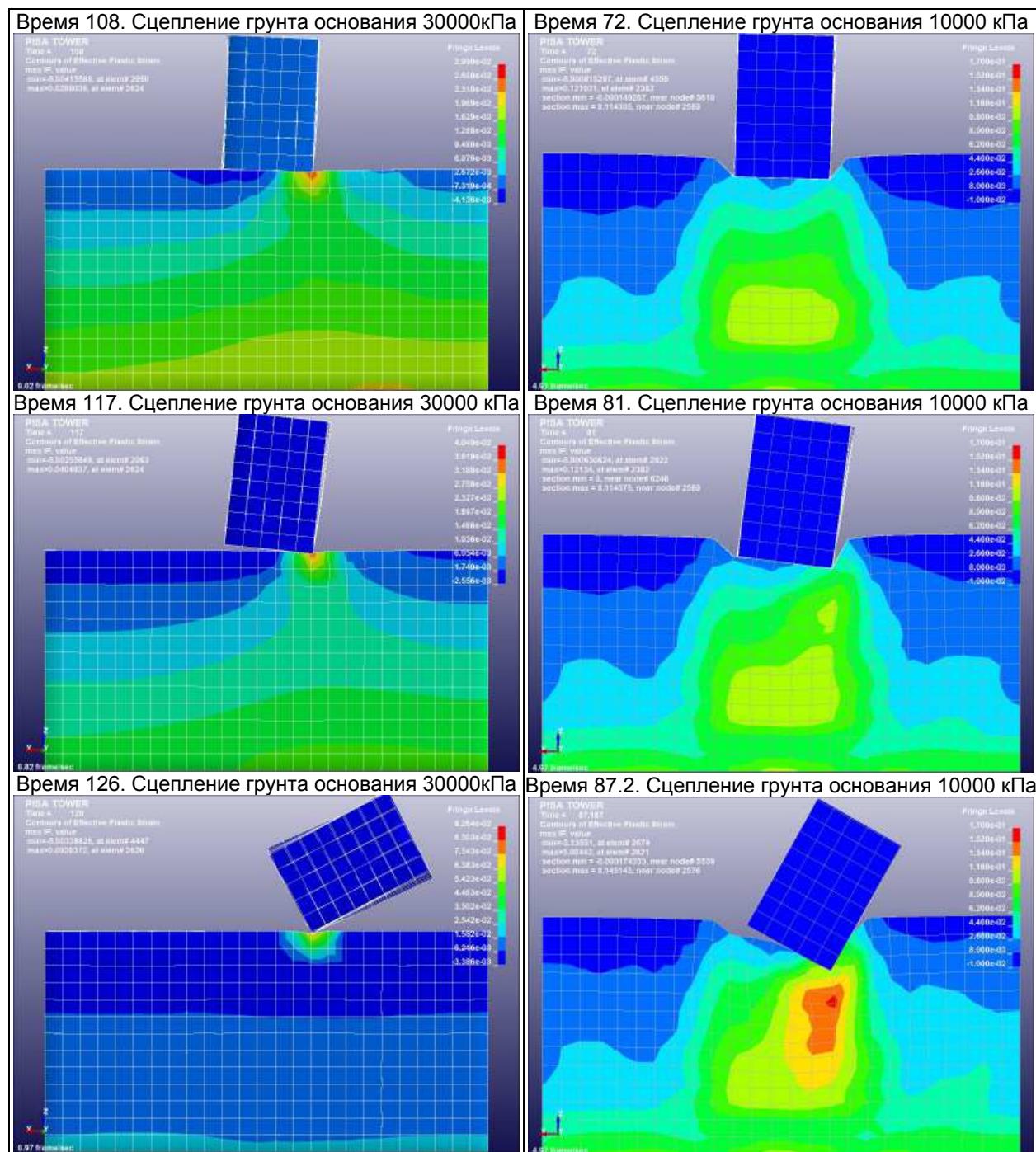


Рис. 4. Поведение сооружения в момент потери устойчивости. Цветом показана интенсивность пластических перемещений в грунте основания. Сооружение ведет себя как жесткая конструкция, благодаря заранее принятым свойствам грунта внутри оболочки



Рис. 5. Графики перемещения верхней части сооружения в направлении оси X и теоретические решения по формуле (1) для 10 и 30 кПа

### Заключение

Новая теоретическая модель реакции сооружения на действие горизонтальной нагрузки предложена и разработана на основе существующих простых аналитических методов и сравнительного исследования численной процедуры деформации грунта основания под установленной на нем конструкцией.

Для создания теоретической модели в систему уравнений статического равновесия были включены методы теории пластичности, основанные на полях скольжения, скатом грунте [3].

Максимальная горизонтальная сила, рассчитанная по теоретической модели, сравнивалась с результатами численного моделирования опрокидывания сооружения. Результаты сравнения показали корреляцию между рассчитанными значениями и временем потери устойчивости сооружения в численном моделировании.

Полученная теоретическая модель функционально связывает основные характеристики модели грунтового основания Мора-Кулонса с основ-

ными размерами сооружения и максимальной горизонтальной опрокидывающей силой. Позволяет выбирать размеры сооружения на основании параметров горизонтальной боковой нагрузки и характеристик грунта в районе установки.

С точки зрения применения результатов для проектирования, полученный метод не учитывает массу факторов, влияющих на работу гидротехнического сооружения гравитационного типа. Если учесть все факторы и получить не максимальную опрокидывающую силу, а максимально допускаемую с учетом допускаемых перемещений, можно получить результат, который будет использоваться для предварительной очень грубой оценки устойчивости сооружения без проведения детальных расчетов.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства образования и науки России, проект 543.

### Литература

1. HESCO Bastion concertainerr 2007. Citing on line sources: <http://www.hescobastion.com/> [cited 08 May 2014].
2. Software Technology Cooperation. LS-DYNA keyword user's manual, Livermore, CA, 2003. p. 1.1–32.36.
3. Kachanov L.M. Foundations of the theory of plasticity. Amsterdam-London: North-Holland Publishing Company; 1971.
4. Lekarp F, Richardson IR, Dawson A. Influences on permanent deformation behavior of unbound granular materials. Transp. Res. Record 1996;1547:68–75.
5. Abbo AJ, Sloan SW. A smooth hyperbolic approximation to the Mohr–Coulomb yield criterion. Comput Struct 1995;54(3):427–41.

6. Desai CS, Siriwardane HJ. Constitutive laws for engineering materials with emphasis on geological materials. New York: Prentice-Hall; 1984.
7. Johnson GR, Cook WH. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In: Proceedings of the 7th international symposium on ballistics, 1983. p. 115–20.
8. Prakash S. Soil dynamics. New York: McGraw-Hill; 1981.

### References

1. HESCO Bastion concertainer 2007. Citing on line sources: <http://www.hescobastion.com/> [cited 08 May 2014].
2. Software Technology Cooperation. LS-DYNA keyword user's manual, Livermore, CA, 2003. p. 1.1–32.36.
3. Kachanov L.M. Foundations of the theory of plasticity. Amsterdam-London: North-Holland Publishing Company; 1971.
4. Lekarp F, Richardson IR, Dawson A. Influences on permanent deformation behavior of unbound granular materials. Transp. Res. Record 1996;1547:68–75.
5. Abbo AJ, Sloan SW. A smooth hyperbolic approximation to the Mohr–Coulomb yield criterion. Comput Struct 1995;54(3):427–41.
6. Desai CS, Siriwardane HJ. Constitutive laws for engineering materials with emphasis on geological materials. New York: Prentice-Hall; 1984.
7. Johnson GR, Cook WH. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In: Proceedings of the 7th international symposium on ballistics, 1983. p. 115–20.
8. Prakash S. Soil dynamics. New York: McGraw-Hill; 1981.

УДК 629.12.001.2

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ ШИРИНЫ КАТАМАРАНА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПРОЧНОСТИ

**Герман Андрей Петрович**, доцент кафедры кораблестроения и океанотехники  
Дальневосточный Федеральный Университет (ДВФУ) Инженерная школа ДВФУ  
Владивосток, Россия  
E-mail: german.ap@dvfu.ru

**Новиков Валерий Васильевич**, кандидат технических наук, доцент  
доцент кафедры кораблестроения и океанотехники  
Дальневосточный Федеральный Университет (ДВФУ) Инженерная школа ДВФУ  
Владивосток, Россия  
E-mail: leka1551@rambler.ru

### АННОТАЦИЯ

Выбор размеров соединительной конструкции катамарана зависит от эксплуатационных, гидродинамических, а также прочностных факторов.

Увеличение ширины моста до определенных пределов способствует уменьшению волнового сопротивления воды движения судна и улучшению ходкости. Однако при этом увеличиваются изгибающие моменты, перерезывающие силы в соединительной конструкции, что может вызвать повышенные напряжения.

Исследование посвящено оценке влияния ширины моста двухкорпусного судна на напряженное состояние соединительной конструкции.

Рассмотрено действие на соединительную конструкцию предельных нагрузок в двух видах: поперечный изгиб моста при свободной подвеске одного из корпусов и скручивание всей конструкции при асимметричном изгибе.

Для определения напряжений была использована методика, основанная на статическом равновесии конструкции с учетом возможных перемещений ее элементов.

Полученные зависимости дают возможность производить оценку прочности проектируемого катамарана и получать конструктивные и весовые характеристики поперечных связей из условия действия в них допустимых нагрузок при разном расстоянии между корпусами, а также назначать предельный клиренс с точки зрения прочности.

**Ключевые слова:** катамаран, соединительный мост, предельное нагружение.

### DEFINITION LIMITING WIDTH OF CATAMARAN IN TERMS OF STRENGTH

**German Andrey Petrovich**, The Associate Professor of Shipbuilding and Ocean Engineering  
Faculty of School of Engineering of Far Federal University  
Far Eastern Federal University, School of Engineering  
Vladivostok, Russia  
E-mail: german.ap@dvfu.ru

**Novikov Valeriy Vasilevich**, PhD. The Associate Professor of Shipbuilding and Ocean Engineering  
Faculty of School of Engineering of Far Federal University  
Far Eastern Federal University, School of Engineering  
Vladivostok, Russia  
E-mail: leka1551@rambler.ru

### ABSTRACT

Dimensioning connecting structure of the catamaran depends on the operational, hydrodynamic and strength factors. Increase in the width of the bridge to some extent promotes reduction the wave resistance of the water of the vessel and improve propulsion.

However the bending moments and shear forces in the connecting structure are increasing. This can cause increased stresses.

The study devoted to the evaluation the impact of the width of the bridge two-hull vessel to the stress state of the connecting structure.

We studied the effect on the connecting structure of ultimate loads in two types: transverse bending of the bridge with the free suspension of one of the hulls and twisting of the whole structure in the asymmetric bending.

To determine the stress method was used based on the static equilibrium structure taking into account the possible movements of its elements.

The obtained dependencies make it possible to assess the strength of the designed catamaran and receive constructive and weight characteristics of cross-linking of the conditions for the operation of their allowable loads when different distances between the hulls, as well as to appoint the clearance limit in terms of strength.

**Key words:** catamaran, bridge, ultimate loading.

При расчете прочности соединительного моста многокорпусного судна в общем случае следует учитывать усилия, действующие в трех плоскостях: в плоскости, параллельной диаметральной и миделю, а также плоскости мостовой конструкции [3]. Величина этих усилий зависит от конструкции и жесткости элементов самого моста. Для регулярной конструкции, состоящей из однородных поперечных балок, разработаны соответствующие расчетные схемы, например [1], позволяющие достаточно просто выполнить проверку прочности. Наличие же на судне надстроек и рубок приводит к перераспределению напряжений в связях моста. Распределение жесткости по длине в этих случаях получается неравномерным, и расчеты с использованием даже упрощенных методик существенно усложняются [2]. Для конструкции, образованной рубкой и поперечными переборками, целесообразно использование методики, основанной на статическом равновесии конструкции с учетом возможных перемещений ее элементов [4].

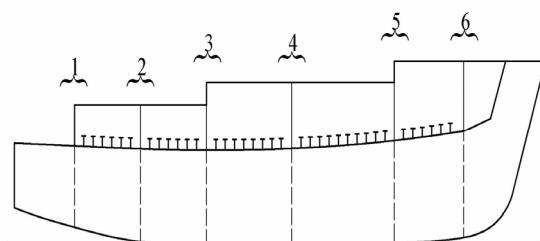


Рис. 1. Схема основных связей соединительной конструкции:  
1, 2, 3, 4, 5, 6 – условные поперечные связи моста

Объектом исследования является геолого-разведочный катамаран длиной  $L = 30$  м с рубкой, поперечные переборки которой совмещены с переборками основных корпусов (рис. 1).

Рассматривалось несколько вариантов размеров соединительного моста. Отношение расстояния между корпусами  $b$  к длине катамарана  $L$  изменялось в пределах  $b/L = 0,1–0,4$  при  $L = \text{const}$ . Соединительная конструкция во всех случаях разбивалась на условные связи – балки. Каждая расчетная связь пропорционально своей жесткости воспринимает часть нагрузки от общей нагрузки, действующей на мост. Поскольку балки опираются на прочные поперечные переборки

левого и правого корпусов, то все балки считаются жестко заделанными по концам.

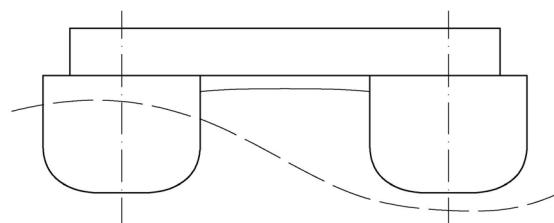


Рис. 2. Предельное нагружение моста при свободной подвеске одного из корпусов катамарана

Для оценки общей прочности соединительной конструкции представляется необходимым оценить действие двух видов экстремальной нагрузки. В первом случае предполагается, что один корпус катамарана защемлен, а второй свободно висит (рис. 2). Нагрузка, равная половине массы катамарана, передается через соединительную конструкцию на защемленный корпус. Такая нагрузка может рассматриваться как предельная [3], а расчетные напряжения в этом случае могут достигать величины опасных напряжений, соответствующих пределу текучести или критическим напряжениям.

Во втором случае рассматривается постановка катамарана на две опоры (рис. 3). Одна опора расположена в носовой части одного корпуса, вторая – в кормовой части другого корпуса. Такая нагрузка на соединительную конструкцию также рассматривается как предельная. Она вызывает скручивание моста и асимметричный изгиб поперечных связей [2, 3].

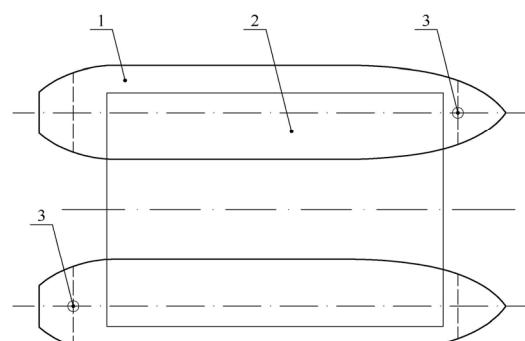


Рис. 3. Положение катамарана на двух асимметрично расположенных опорах:  
1 – корпус; 2 – мост; 3 – опоры корпусов

## Свободная подвеска одного из корпусов

Для определенности будем считать левый корпус защемленным, правый – свободным. При таком нагружении мост испытывает поперечный изгиб. Соединительная конструкция представляется в виде системы параллельных балок, жестко защемленных у внутренних бортов корпусов. Изменение длины балок вследствие сужения корпусов катамарана в окончностях незначительно влияет на жесткость балок и, соответственно, на напряжения в соединительной конструкции моста [2]. С некоторой погрешностью примем длину пролета всех балок одинаковой ( $l = \text{const} = b$ ).

Перемещения системы балок будем характеризовать вертикальным смещением правого опорного сечения балок  $v$ , вертикальным линейным перемещением, связанным с дифферентом корпуса  $\psi$ , и угловым перемещением плоскости правого опорного сечения  $\varphi$ .

За положительные направления перемещений примем следующие:

$v$  – по направлению вниз;  $\psi$  – соответствующее прогибу балок соединительной конструкции.

Указанные перемещения соответствуют вертикальным силам  $P$ , приложенными к правым опорным сечениям балок, изгибающим моментам  $M$ , действующим в тех же сечениях, и дифференцирующему моменту  $M$  сил  $P$  относительно миделя.

Силы и моменты для произвольной  $i$ -той балки, выраженные через перемещения и коэффициенты жесткости, определяются из известных выражений строительной механики корабля [4,5]:

$$\begin{aligned} P_v &= v \cdot C_{pv}; & P_\psi &= \psi \cdot L \cdot C_{p\psi}; & P_\varphi &= \varphi \cdot l \cdot C_{p\varphi}; \\ M_v &= v \cdot x \cdot C_{Mv}; & M_\psi &= \psi \cdot L \cdot C_{M\psi}; & M_\varphi &= \varphi \cdot l \cdot C_{M\varphi}; \\ M &= v \cdot x \cdot C_{pv}; & M_\psi &= \psi \cdot L \cdot x \cdot C_{p\psi}; & M_\varphi &= \varphi \cdot L \cdot x \cdot C_{p\varphi}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $L$  – длина корпуса;  $l$  – длина пролета балки (ширина моста  $b$ ), а  $C_p$  и  $C_M$  – коэффициенты жесткости [3];  $J$ ,  $\omega_{np}$  – момент инерции поперечного сечения и приведенная площадь сечения балки.

Коэффициенты жесткости основных связей зависят от геометрических размеров элементов конструкции и характеристик металла, а потому оказывают влияние на напряженное состояние конструкции для рассматриваемой ширины моста.

Уравнения статического равновесия в общем виде можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \sum P &= 0,5\Delta; \\ \sum M &= -0,5\Delta x_g; \\ \sum M &= -0,5\Delta(B_1/2), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Delta$  – весовое водоизмещение катамарана;  $x_g$  – абсцисса центра тяжести судна;  $B_1$  – ширина одного корпуса катамарана.

В сечении балки соединительной конструкции на правой опоре нагрузки равны сумме составляющих усилий и изгибающих моментов, т.е.:

$$\begin{aligned} P &= P_v + P_\psi + P_\varphi; \\ M_\Pi &= M_v + M_\psi + M_\varphi. \end{aligned} \quad (3)$$

Тогда в сечении на правой опоре перерезывающая сила  $N = P$ , а изгибающий момент  $M = P \cdot l - M_\Pi$ .

## Постановка катамарана на две асимметрично расположенные опоры

Задача о постановке катамарана на две асимметрично расположенные опоры (рис. 3) решается аналогично выше рассмотренной задаче. В этом случае угол поворота корпуса  $\varphi = 0$ , а уравнения равновесия принимают вид:

$$\begin{aligned} P &= P_v + P_\psi = 0; \\ M_v + M_\psi &= 0,5 \cdot \Delta \cdot l_0, \end{aligned} \quad (4)$$

или

$$\begin{aligned} v \cdot \sum C_{pv} + \psi \cdot L \cdot \sum C_{p\psi} &= 0; \\ v \cdot \sum \frac{x}{L} C_{pv} + \psi \cdot L \cdot \sum \frac{x}{L} C_{p\psi} &= 0,5 \cdot \Delta \cdot \frac{l_0}{L}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $l_0$  – отстояние опоры от миделя.

Решение системы уравнений (5) позволяет перейти к определению усилий и напряжений по вышеприведенным формулам.

Для приведенных выражений в Excel составлена программа расчета, позволяющая для заданных исходных величин определять перерезывающие силы, изгибающие моменты и напряжения в связях соединительной конструкции. Исходными данными являются геометрические характеристики поперечных связей (момент инерции поперечного сечения и приведенная площадь связи) и размерения катамарана (длина, ширина, горизонтальный клиренс).

## Анализ напряженного состояния соединительной конструкции

Проведенный численный анализ показывает, что в случае изгиба при свободной подвеске корпуса величина перерезывающих сил в связях корпуса и их изменение остаются незначительными при увеличении расстояния между корпусами катамарана. В большей степени происходит рост изгибающих моментов. С увеличением ширины соединительной конструкции от 3 до 10 м изгибающие моменты возрастают тем интенсивнее, чем больше жесткость связи. Соответственно увеличиваются и нормальные напряжения. Например, если величина касательных напряжений остается практически постоянной для всех вариантов моста, то увеличение его ширины в четыре раза приводит к росту нормальных напряжений почти в три раза (табл. 1). Абсолютная величина напряжений при этом находится в допустимых пределах.

Таблица 1  
Напряжения в крайних связях  
Соединительной конструкции

<i>b</i> , м	3	4	5	6	7	8	10	12
Напряжения в крайней поперечной связи №1 моста при свободной подвеске корпуса								
$\tau$ , MPa	16	18	20	21	21	21	21	21
$\sigma$ , MPa	66	78	89	103	116	129	143	160
Напряжения в крайней поперечной связи №6 моста при асимметричном изгибе								
$\tau$ , MPa	-99	-101	-109	-117	-122	-125	-127	-127
$\sigma$ , MPa	-96	-145	-200	-251	-309	-373	-451	-552

**Примечание:** Касательные  $\tau$  и нормальные напряжения  $\sigma$  определяются как отношение перерезывающих сил  $N$  и изгибающих моментов  $M$  к приведенной площади  $\omega_{np}$  и соответственно к минимальному моменту сопротивления  $W_{min}$  поперечного сечения связи.

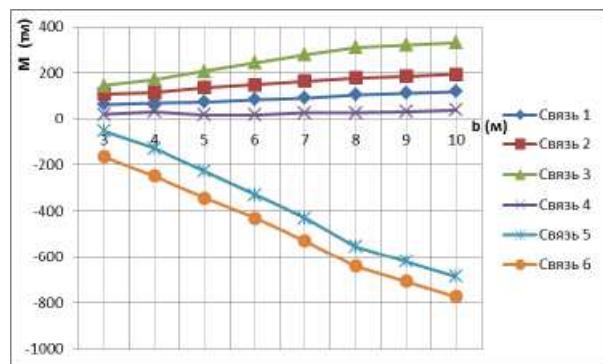


Рис. 4. Изменение изгибающих моментов при увеличении ширины соединительной конструкции при асимметричном изгибе

Предельное нагружение соединительного моста путем постановки катамарана на две асимметрично расположенные опоры (см. рис. 3) кардинально изменяет картину распределения усилий в связях. Соединительная конструкция находится в условиях скручивания, при этом перерезывающие силы и изгибающие моменты (рис. 4) изменяются по величине в связях по длине моста и меняют знак при переходе от носовой к кормовой его половине.

Касательные напряжения в поперечных связях при этих нагрузках оказываются несколько большими, чем при поперечном изгибе соединительной конструкции, но величина их относительно невелика ( $\tau \sim 0,4 \sigma_m$ ). Наиболее нагруженными являются крайние поперечные связи моста. Увеличение ширины моста при асимметричном изгибе приводит к более интенсивному росту нормальных напряжений. Так, при увеличении ширины моста в 4 раза нормальные напряжения в крайней связи возросли почти в 6 раз, а их абсолютная величина превысила предел текучести стали.

Зависимости величин касательных и нормальных напряжений показаны на рисунках 5–8, где касательные и нормальные напряжения для удобства выражены в долях от предела текучести  $\sigma_m$  через безразмерные коэффициенты соответственно  $K_\tau = \tau / \sigma_m$  и  $K_\sigma = \sigma / \sigma_m$ .

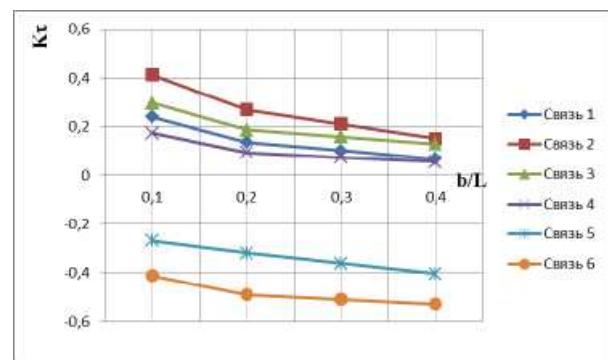


Рис. 5. Влияние ширины моста на величину относительных касательных напряжений при асимметричном изгибе

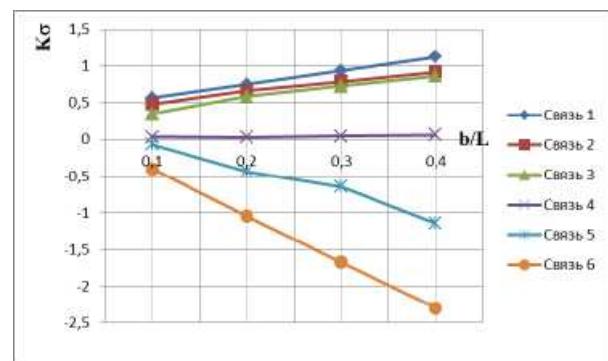


Рис. 6 . Влияние ширины моста на величину относительных нормальных напряжений при асимметричном изгибе

Для связей, расположенных в середине моста, при поперечном его изгибе напряжения оказываются несколько большими по сравнению с напряжениями в этих же связях при асимметричном изгибе. Однако для концевых поперечных связей асимметричный изгиб вызывает скручивание конструкции, что приводит к появлению более повышенных нормальных напряжений, двукратно превышающих в данном случае предел текучести материала.

Если принять для предельного нагружения в качестве допускаемого напряжения в первом приближении предел текучести  $\sigma_t$  (на графиках рисунков 7, 8 это прямая 3), то после несложных вычислений можно получить необходимый момент сопротивления поперечной связи для назначеннной ширине соединительной конструкции.

Полученные зависимости, таким образом, позволяют лимитировать уровень напряжений в конструкции, назначая более прочные связи с необходимыми моментом сопротивления и приведенной площадью поперечного сечения, которые соответствовали бы действующим нагрузкам при заданной ширине соединительного моста катамарана. Это представляется важным на этапах начального проектирования судна. Для данной конструкции предельно допустимый горизонтальный клиренс с точки зрения прочности равен отношению  $b/L=0,2$  (рис. 8), что соответствует ширине моста, равной ~ 6 м.

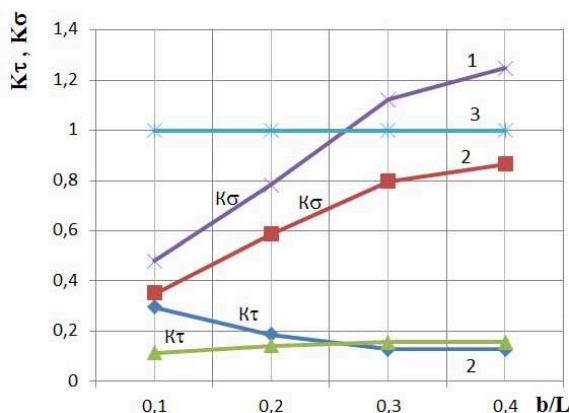


Рис. 7. Напряжения в средней поперечной мостовой связи конструкции (связь № 3) при изменении ширины моста.  $K_\tau = \tau/\sigma_m$ ;  $K_\sigma = \sigma/\sigma_m$ ; 1 – поперечный изгиб; 2 – асимметричный изгиб; 3 – соответствует  $\sigma_\tau$

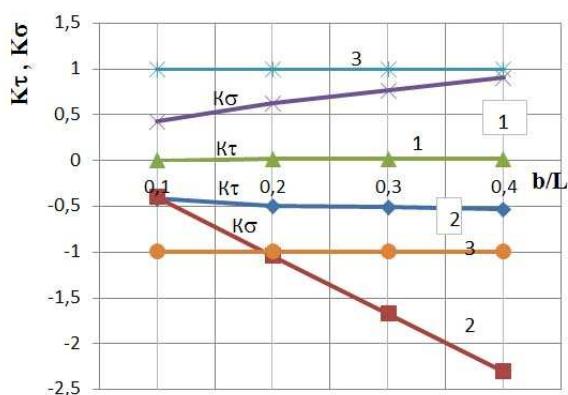


Рис. 8. Напряжения в концевой поперечной мостовой связи конструкции (связь № 6) при изменении ширины моста.  $K_\tau = \tau/\sigma_m$ ;  $K_\sigma = \sigma/\sigma_m$ ; 1 – поперечный изгиб; 2 – асимметричный изгиб; 3 – соответствует  $\sigma_\tau$

## Заключение

Выбор ширины моста при проектировании судна зависит от многих эксплуатационных, гидродинамических и других факторов, одним из которых может быть его прочность. Проведенное расчетное исследование по предельным нагрузкам позволило установить связь между горизонтальным клиренсом данного двухкорпусного судна и прочностью соединительного моста, представляющего собой рубку с поперечными переборками. Составленная программа и графические зависимости дают возможность производить оценку прочности проектируемого катамарана, получать конструктивные и весовые характеристики поперечных конструктивных связей из условия действия в них допустимых нагрузок при разном расстоянии между корпусами и устанавливать лимитирующую ширину моста с точки зрения прочности.

Исследование выполнено при поддержке Программы «Научный фонд» ДВФУ в рамках исполнения обязательств по соглашению № 12-08-13021-21/13.

## Литература

1. Галахов И.Н., Волкова У.Б. К расчету прочности двухкорпусного судна с регулярной конструкцией соединительного моста // Вопр. судостроения. Серия 1. Проектирование судов. Вып. 2. 1973. 144 с.
2. Герман А.П., Новиков В.В. Оценка влияния изменения ширины соединительного моста двухкорпусного судна на напряженное состояние // Морские интеллектуальные технологии. Спецвыпуск. 2013. № 2. С. 69–73.
3. Давыдов В.В., Маттес Н.В., Сиверцев И.Н., Трянин И.И. Прочность судов внутреннего плавания: справочник. Изд. 3-е.– М.: Транспорт, 1978. 520 с.
4. Петрищев К.Ф. Расчет прочности соединительной конструкции. Приморское центральное конструкторское бюро. 10160-010-007, 1977. 16 с.
5. Справочник по строительной механике корабля. Т. 1. – Л.: Судостроение, 1982. 376 с.

## References

1. Galakhov I.N., Volkova U.B. K raschetu prochnosti dvukhkorpusnogo sudna s reguljarnoy konstruktsiey soedinitel'nogo mosta. Vopr. sudostroeniya. Seriya 1. Proektirovaniye sudov. Vyp. 2. 1973. 144 s.
2. German A.P., Novikov V.V. Otsenka vliyaniya izmeneniya shiriny soedinitel'nogo mosta dvukhkorpusnogo sudna na napryazhennoe sostoyanie. Morskie intellektual'nye tekhnologii: spetsvypusk. 2013. № 2. S. 69–73.
3. Davydov V.V., Mattes N.V., Sivertsev I.N., Tryanin I.I. Prochnost' sudov vnutrennego plavaniya: spravochnik. Izd. 3-e. M.: Transport, 1978. 520 s.
4. Petrishchev K.F. Raschet prochnosti soedinitel'noy konstruktsii. Primorskoе tsentral'noe konstruktorskoe byuro. 10160-010-007, 1977. 16 s.
5. Spravochnik po stroitel'noy mekhanike korablya. T. 1. L.: Sudostroenie, 1982. 376 s.

УДК 621.822.175

## РАСЧЕТНАЯ СХЕМА РАДИАЛЬНОГО ЛЕПЕСТКОВОГО ГИБРИДНОГО ПОДШИПНИКА

**Грибиниченко Матвей Валерьевич**, кандидат технических наук, доцент

Заведующий кафедрой «Судовой энергетики и автоматики»

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

E-mail: gribinichenko.mv@yandex.ru

**Куренский Алексей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

**Гладкова Наталья Александровна**, доцент

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

**Куценко Наталья Владимировна**, аспирант

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

### АННОТАЦИЯ

Высокооборотные турбомашины благодаря малой массе могут эффективно применяться в различных механизмах. Но надежность их работы зависит от состояния подшипников. Одним из перспективных путей повышения долговечности и надежности подшипников является применение газовой смазки. Недостатком таких подшипников является невысокая несущая способность. Известны несколько способов повышения несущей способности таких подшипников. Среди них применение газовых подшипников с податливыми рабочими поверхностями (лепестковых подшипников), которые рассматриваются в данной работе.

В статье приводится описание расчетной схемы и разрабатываемой модели подложки, которую можно применять при расчете как радиальных, так и осевых подшипников с газовой смазкой. Схема включает комбинацию упругих элементов и позволяет усовершенствовать проектирование подшипников с газовой смазкой. Изменяя в процессе расчета значения жесткостей упругих элементов, возможно подобрать необходимые характеристики подшипника.

**Ключевые слова:** газостатический, газодинамический, гибридный, смазка, упругая подложка, газовый подшипник, несущая способность, жесткость.

## CALCULATION SCHEME OF THE RADIAL FOIL HYBRID BEARING

**Gribinichenko Matvei Valerievich**, Cand. Tech.Sci., associate professor,

Head of chair “Marine power engineering and automatics”

The far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

E-mail: gribinichenko.mv@yandex.ru

**Kurenskii Alexei Vladimirovich**, Cand. Tech.Sci, associate professor,

The far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

**Gladkova Natalia Alexandrovna**, associate professor

The far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

**Kutsenko Natalia Vladimirovna**, post-graduate student

The far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

## ABSTRACT

High-speed rotodynamic machines due to the low weight can be effectively used in various mechanisms. But the reliability of their operation depends on the condition of bearings. One of the promising ways to increase the durability and reliability of bearings is the use of gas lubrication. The drawback of such bearings is a low bearing capacity. There are several ways to increase the carrying capacity of these bearings, among them is the use of gas bearings with yielding work surfaces (segment bearings), which are considered in this paper.

The article provides for the description of the design model and substrate model developed which can be used in the calculations of both radial and axial bearings with gas lubrication. The model includes a combination of elastic elements and allows improving gas lubrication bearing design. Changing the stiffness values of elastic elements in the process of the calculation, it is possible to find the necessary characteristics of the bearing.

**Key words:** gas-static, gas-dynamic, hybrid, lubrication, elastic substrate, gas bearing, bearing capacity, stiffness.

Постоянно растущие требования к эффективности работы турбомашин различного назначения влекут за собой новые инженерные решения, многие из которых направлены на снижение потерь на трение и увеличение ресурса машин.

Увеличение числа оборотов и мощностей современных турбомашин при одновременном снижении их веса в значительной степени зависит от состояния подшипников, грузоподъемности и срока их службы. Одним из успешных решений проблем повышения долговечности и надежности подшипников турбомашин, является применение газовой смазки.

Газовые подшипники, обладая многими преимуществами, имеют и существенный недостаток – малую несущую способность смазочного слоя, который значительно ограничивает применение газовой смазки в технике. Существует несколько способов повышения несущей способности. Одним из наиболее перспективных является применение комбинированных или гибридных подшипников, в которых совмещаются свойства нескольких типов опор (например, магнитных и газовых, газодинамических и газостатических). Проведенные исследования пока-

зали эффективность использования гибридных подшипников в составе агрегатов различного назначения [3,1,5]. Другим не менее эффективным способом является применение газовых подшипников с податливыми рабочими поверхностями (лепестковые подшипники). Применение податливой рабочей поверхности позволяет осуществить надежную работу газового подшипника при малых зазорах (менее 10 микрометров), при которых наблюдается значительное проявление газодинамического эффекта [1,2,7].

Совмещение вышеуказанных методов привело к появлению нового типа газовых опор – гибридных лепестковых подшипников. Исследуются как осевые, так и радиальные опоры. Настоящая статья посвящена радиальным гибридным лепестковым подшипникам.

Создание полномасштабных экспериментальных установок для исследования тех или иных характеристик не всегда является возможным, поэтому с развитием современных компьютерных технологий все чаще появляется возможность, использования численных методов решения задач газовой смазки и получения при расчетах точных результатов.

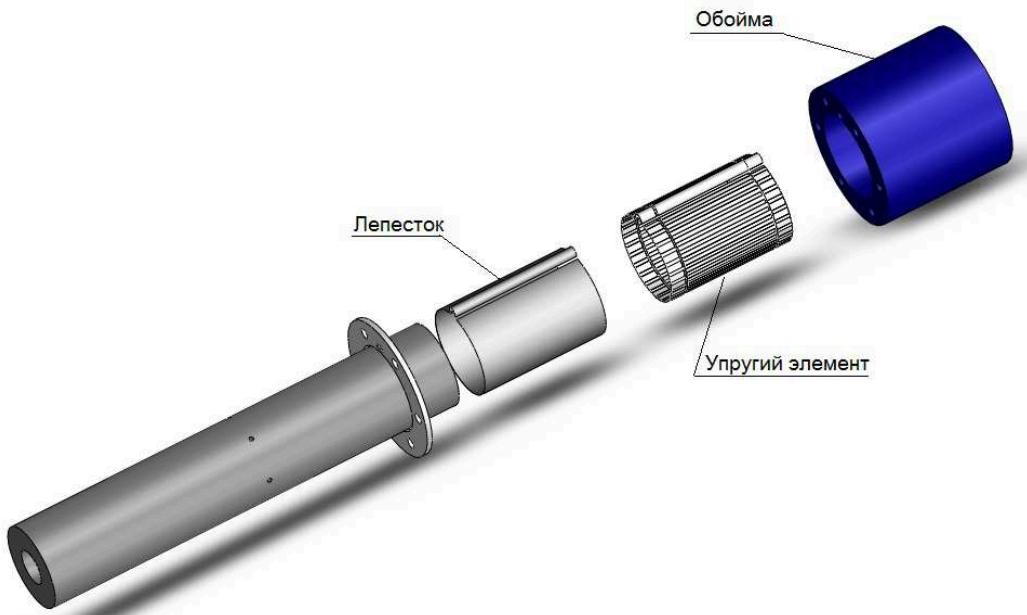


Рис. 1. Конструкция радиального гибридного лепесткового подшипника

Рассмотрим принципиальную схему такого подшипника (рис.1). В обойму вставляется упругий элемент (на рис.1 он показан в виде гофрированной подложки) и лепесток, формирующий форму рабочей поверхности и имеющий специальное антифрикционное покрытие, обеспечивающее безаварийную работу в слу-

чае возникновения сухого трения. Подача сжатого воздуха, необходимая для возникновения газостатического эффекта, организована через вал. Некоторое неудобство такой схемы компенсируется значительными преимуществами применения гибридного подшипника. На рис. 2 показана расчетная схема.

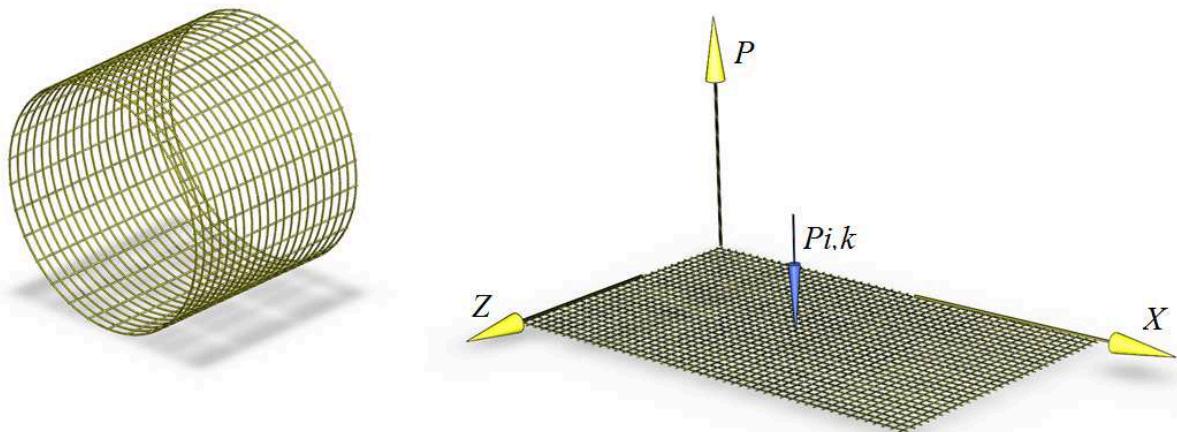


Рис. 2 Рабочая поверхность радиального подшипника

Рабочая поверхность имеет цилиндрическую форму, развернутая поверхность подшипника представлена в виде прямоугольной формы (рис.2). Развертка разбивается сеткой, линии которой параллельны осям  $x$  и  $z$ .

С помощью уравнений газовой смазки рассчитывается давление в каждой точке рабочей поверхности.

Расчет характеристик радиальных лепестковых гибридных подшипников сводится к получению поля распределения давлений в смазочном слое и интегральных характеристик (несущей способности, мощности и момента трения, расхода газа подаваемого на смазку).

Основным уравнением газовой смазки, является уравнение Рейнольдса при помощи которого можно определить основные интегральные характеристики (несущую способность, момент, мощность трения) радиального газодинамического подшипника [3].

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{h^3 dP^2}{dx} \right) + \frac{d}{dz} \left( \frac{h^3 dP^2}{dz} \right) = 12\mu V \frac{d(Ph)}{dz}$$

где  $h$  – толщина смазочного слоя;  $P$  – давление газа в слое;  $\mu$  – динамическая вязкость газа,  $\mu = \text{const}$ , т.к. температура в подшипнике изменяется незначительно;  $V$  – окружная скорость цапфы.

Уравнение решается численным методом и позволяет найти давление на всей поверхности подшипника. К этому уравнению вводятся граничные условия – давление на кромках питателей и на краях подшипника.

### Расчетная схема податливой рабочей поверхности

Отправной точкой разработки модели упругих оснований подшипников с газовой смазкой принята расчетная схема показанную на рис. 3 [5].

В работе [5] предложено на этапе расчета характеристик газовой опоры не уточнять конструкцию упругой подложки, а представить ее в виде набора упругих элементов, на которые опираются участки рабочей поверхности.

Каждый упругий элемент имеет собственное, отличное от других, значение жесткости. Изменяя в процессе расчета значение жесткостей упругих элементов, предлагается подобрать необходимые характеристики подшипника. В результате будет получено поле распределения давлений в смазочном слое и соответствующее, наиболее подходящее, поле распределения жесткостей по рабочей поверхности. Эти данные должны стать основой при разработке конструкции упругой подложки.

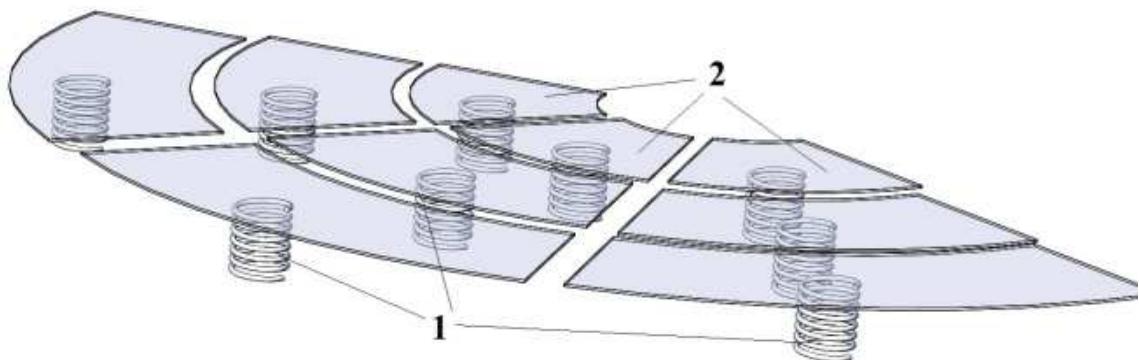


Рис.3. Расчетная схема упругой рабочей поверхности сегмента осевого подшипника:  
1 – упругие элементы, 2 – участки рабочей поверхности

Такой метод удобен, но допускает некоторые упрощения. Например, считается, что лепесток не прогибается между узлами сетки, а копирует их деформацию. Кроме того, не учитываются упругие свойства самого лепестка или взаимодействия между собой набора лепестков (если их несколько). Также считается, что деформация рассматриваемой области рабочей поверхности зависит только от приложенной на данном участке силы, а деформация соседних участков не оказывает никакого влияния.

В данной работе предлагается алгоритм расчета, при котором любая из рассматриваемых конструкций упругих подложек приводится к схеме подложки в виде таких условных упругих элементов. Автор считает, что основное внимание должно быть уделено заданию упругих характеристик этих элементов соответствующих той или иной конструкции подложки.

Начиная рассматривать расчет упругих рабочих поверхностей необходимо более подробно остановиться на требованиях, которые к ним выдвигаются. Свод таких требований и их анализ предлагается в работах [6] и [5].

Перечислим эти требования, останавливаясь кратко на их анализе.

1. Податливость лепестка (упругой рабочей поверхности) должна быть больше, чем податливость смазочного слоя.

Это требование вытекает из самой сути применения лепестковых подшипников и не вызывает сомнений.

На основе этого требования в работе [5] рассматривается схема взаимодействия смазочного слоя и податливой рабочей поверхности, формулируется следствие: *необходимо, чтобы при увеличении нагрузки в каждой точке податливой рабочей поверхности, изменение прогиба было не менее половины смещения пяты относительно под пятника*.

В работе [5] рассматриваются осевые подшипники, но это требование вполне применимо и для радиальных опор. Дело в том, что здесь рассматривается некоторая небольшая часть рабочей поверхности подшипника, которая вполне может являться составной частью как осевого так и радиального подшипника.

2. Рассматривая свойства смазочного слоя, автор [5] указывает, что поскольку смазочный слой, как упругая среда, имеет в каждой точке своё, отличное от других значение жесткости, то и податливая рабочая поверхность должна иметь жесткость отличную в разных точках. Такая конструкция названа подложкой с переменной податливостью по рабочей поверхности. Отметим, что указание на различные точки смазочного слоя предполагает двухкоординатную схему, показанную на рис. 3. При этом свойства смазочного слоя не изменяются в направлении нормали к рабочей поверхности (т.е. по толщине слоя).

Отмечается, что на практике задача создания подложки с переменной податливостью может оказаться излишне сложной или невозможной.

3. Сформулированы требования, вытекающие из анализа основных эксплуатационных характеристик турбомашин в которых предлагается применять газовые опоры. Это обеспечение установленных допусков на осевые перемещения ротора турбомашины и возможности удаления твердых частиц попадающих в смазочный зазор путем временной деформации лепестка.

Набор вышеперечисленных требований определяет числовой интервал, в котором следует выбирать значения упругости подложки. Эти требования могут быть сформированы в виде свода ограничений, которые возможно включить в блок управления программой расчета упругой подложки, составленной на основе разработанной математической модели. Эта операция была проделана в ходе составления такой программы, которая является частью инженерной методики автоматизированного проектирования податливых рабочих поверхностей предлагаемой в настоящей работе.

Подводя итог вышеперечисленным требованиям можно определить, что упругая подложка, а точнее вся податливая рабочая поверхность должна быть рассчитана на основании свойств соответствующего смазочного слоя. Рассматривая слой как упругую среду, необходимо подобрать такие значения податливости в каждой точке рабочей поверхности, чтобы они отвечали свойствам слоя.

Продолжая рассуждения относительно свойств упругих подложек, приведенные в работе [5], отметим, что в понятие переменной податливости подложки (или, если быть точнее, в понятие переменной податливости рабочей поверхности) необходимо вложить более широкий смысл. Во-первых, как уже говорилось ранее, податливость должна быть отлична в каждой точке рабочей поверхности. Кроме того, податливость должна изменяться при изменении деформации конструкции. Поясним это на простом примере. При анализе результатов численных и физических экспериментов, которые приводятся в литературе, отмечается, что зависимость несущей способности от величины смазочного слоя имеет нелинейный характер. Несущая способность, умеренно возрастающая при уменьшении величины слоя до 10–15 микрометров, затем резко увеличивается (рис. 4).

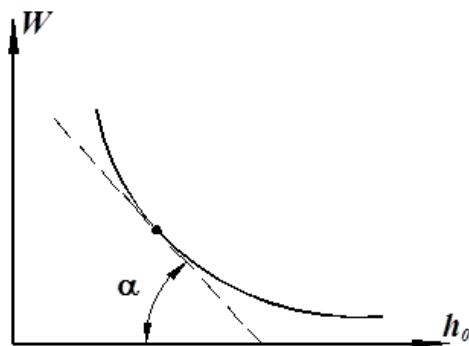


Рис. 4. Общий вид зависимости несущей способности от величины смазочного слоя

Жесткость смазочного слоя, которая рассматривается как отношение приращения несущей способности к изменению величины смазочного зазора, имеет переменное значение. Это наглядно показано на рис.4, где жесткость смазочного слоя является тангенсом угла  $\alpha$ . Таким образом, должна иметь переменное значение жесткости (податливости) и рабочая поверхность, причем закон изменения податливости смазочного слоя в зависимости от деформации должен

соответствовать закону изменения податливости смазочного слоя.

Зависимость, представленная на рис.4 будет характерна не только для несущей способности всего подшипника, но и для несущей способности какого-либо малого участка рабочей поверхности. При этом такие зависимости будут отличаться для различных участков смазочного слоя.

Путем таких рассуждений можно прийти к выводу, что податливая рабочая поверхность должна иметь сложную конструкцию, обеспечивающую не просто отличное от других значение податливости в каждой точке поверхности, а отличный от других закон изменения податливости в каждой точке рабочей поверхности в зависимости от деформации рабочей поверхности подшипника.

Схема будет состоять из двух основных частей: пакета лепестков 1 (см.рис.5) и набора элементов 2 и 3 формирующих упругую подложку.

Упругие свойства податливой рабочей поверхности будут складываться из упругих свойств пакета лепестков и подложки. При этом такие свойства рабочей поверхности как переменная податливость будут определяться конструкцией упругой подложки, а не пакета лепестков.

Схему этой конструкции представим в виде, показанном на рис.5. Здесь показаны два лепестка 1 (количество лепестков может изменяться) и упругая подложка, которая имеет набор упругих элементов 3 расположенных в некотором порядке и связанных между собой поверхностью 2.

Различные реальные конструкции подложек будут являться частными случаями решения этой модели. Например, упругие элементы некоторых подложек, которые будут рассматриваться ниже, могут не иметь связи между собой. Этого можно добиться, не учитывая упругие свойства поверхности 3 (т.е. принимаются нулевые значения определенных параметров подложки).

На рис.6 показана схема собранной упругой рабочей поверхности и её взаимодействие со смазочным слоем. Как видно из рисунка смазочный слой рассматривается как некоторая упругая среда, действующая на рабочую поверхность по нормали.

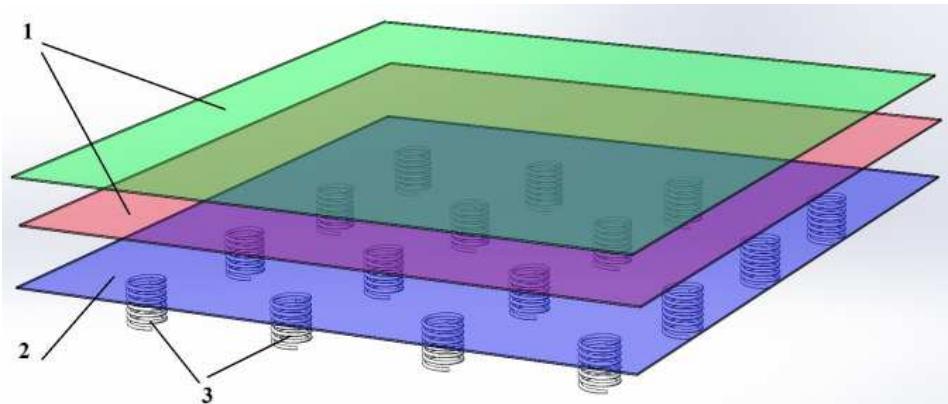
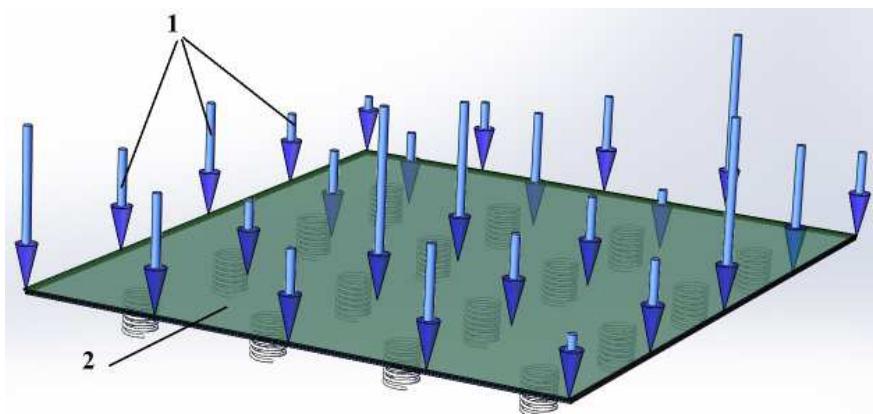


Рис.5 Схема основных составных частей упругой рабочей поверхности:  
1 – пакет лепестков, 2 – упругая подложка, 3 – упругий элемент



*Рис.6. Расчетная схема взаимодействия упругой рабочей поверхности со смазочным слоем:  
1 – давление смазочного слоя; 2 – упругая рабочая поверхность*

Такая схема, позволяет составить некоторую общую математическую модель упругих подложек.

Обратим внимание, что схема, представленная на рис.3 ориентирована на осевые подшипники. В настоящей работе разрабатывается модель подложки, которую можно применять при расчете как радиальных, так и осевых подшипников.

### Заключение

Разработанная расчетная схема радиального гибридного подшипника позволяет перейти к со-

ставлению математической модели и проведению численного эксперимента для изучения характеристик предложенной конструкции газовой опоры.

*Работа выполнена в рамках госзадания Министерства образования и науки России, проект 543.*

### Литература

1. Грибиниченко М.В. Осевые гибридные подшипники с газовой смазкой для турбокомпрессоров наддува судовых ДВС.: Дис... канд.техн.наук. Владивосток., ДВГТУ, 2006. 133 с.
2. Грибиниченко, М.В. Разработка конструкции осевого подшипника с газовой смазкой для турбомашин судовых энергоустановок / М.В. Грибиниченко М.В., Куренский А.В., Синенко Н.В. // Вестник машиностроения. 2013. № 7. С. 50–53.
3. Космынин А.В. Применение подшипников на газовой смазке / А.В. Космынин, В.С. Щетинин, А.С. Хвостиков, Н.А.Иванова, А.А. Космынин // Успехи современного естествознания. 2012. № 9. С. 92–95.
4. Константинеску, В. Н. Газовая смазка / В.Н. Константинеску. – М.: Машиностроение, 1968. 708 с.
5. Куренский А.В. Повышение несущей способности осевых гибридных лепестковых подшипников на газовой смазке судовых турбомашин.: Дис... канд. техн. наук. – Владивосток., ДВГТУ, 2012. 168 с.
6. Самсонов, А. И. Подшипники с газовой смазкой для турбомашин: монография / А. И. Самсонов. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. 292 с.
7. Gribinichenko,M.V. Axial bearing gas lubrication for marine turbines / M.V. Gribinichenko, Kurenskii A.V., Sinenko N.V. // Russianengineeringresearch. 2013. Vol.33. № 10. P. 566–568.

### References

1. Gribinichenko M.V. Osevyye gibridnye podshipniki s gazovoj smazkoj dlja turbokompressorov nadduva sudovyh DVS.: Dis... kand.tehn.nauk. Vladivostok., DVGTU, 2006. 133s.
2. Gribinichenko M.V. Razrabotka konstrukcii osevogo podshipnika s gazovoj smazkoj dlja turbomashin sudovyh jenergoustanovok. M.V. Gribinichenko M.V., Kurenskij A.V., Sinenko N.V. Vestnik mashinostroenija. 2013. № 7. S. 50–53.
3. Kosmynin A.V. Primenenie podshipnikov na gazovoj smazke. A.V. Kosmynin,V.S.Shhetinin, A.S. Hvos- tikov, N.A.Ivanova, A.A. Kosmynin. Uspehi sovremennoego estestvoznanija. 2012. № 9. S. 92–95.
4. Konstantinesku V. N. Gazovaja smazka. V.N. Konstantinesku. M.: Mashinostroenie, 1968. 708 s.
5. Kurenskij A.V. Povyshenie nesushhej sposobnosti osevyh gibriddeny lepestkovykh podshipnikov na gazovoj smazke sudovyh turbomashin.:Dis... kand. tehn. nauk. Vladivostok., DVGTU, 2012. 168 s.
6. Samsonov A. I. Podshipniki s gazovoj smazkoj dlja turbomashin: monografija. A. I. Samsonov. Vladivos- tok: Izd-vo DVGTU, 2009. 292s.
7. Gribinichenko M.V. Axial bearing gas lubrication for marine turbines. M.V. Gribinichenko, Kurenskii A.V., Sinenko N.V. Russianengineeringresearch. 2013. Vol. 33. №10. P. 566–568.

УДК 629.5.012

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ БАРЖИ И СЛИПА ПРИ ПЕРЕДВИЖКЕ ТЯЖЕЛОВЕСНОГО ГРУЗА

**Антоненко Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор,  
 профессор кафедры Кораблестроения и океанотехники  
 Дальневосточный федеральный университет, Инженерная школа,  
 кафедра Кораблестроения и океанотехники  
 Владивосток, Россия  
 E-mail: antonenko48@rambler.ru

**Китаев Максим Владимирович**, кандидат технических наук,  
 старший преподаватель кафедры Кораблестроения и океанотехники  
 Дальневосточный федеральный университет, Инженерная школа,  
 кафедра Кораблестроения и океанотехники  
 Владивосток, Россия  
 E-mail: maxkit@mail.ru

**Немкин Дмитрий Викторович**, магистр  
 аспирант кафедры Кораблестроения и океанотехники  
 Дальневосточный федеральный университет, Инженерная школа,  
 кафедра Кораблестроения и океанотехники  
 Владивосток, Россия  
 E-mail: dimasenchek@mail.ru

### АННОТАЦИЯ

Транспортировка тяжеловесных крупногабаритных грузов является технически сложной задачей. Такая задача возникла в связи с поставкой оборудования для Комсомольского-на-Амуре нефтеперерабатывающего завода. Транспортировка осуществляется с помощью несамоходных барж, на их палубах размещается оборудование. Для выгрузки его на берег предусмотрено строительство слипа. В работе рассматриваются вопросы обеспечения прочности конструкций баржи и слипа в процессе выгрузки.

Расчёты выполнены по схеме балки, лежащей с начальным зазором на податливых опорах. Для расчётов использовался метод пяти моментов. Рассмотрены варианты балластировки баржи при подъёме на слип.

Приводятся результаты расчётов нагрузок на тележки слипа при подъёме баржи с крупногабаритным тяжеловесным грузом и при передвижке груза с баржи на береговую площадку. Сообщается о практических рекомендациях, разработанных по результатам расчётов. Данна краткая информация о проведённой операции по выгрузке оборудования на берег.

**Ключевые слова:** баржа, слип, тележки слипа, реакции, передвижка, тяжеловесный крупногабаритный груз.

## BARGE AND SLIP STRUCTURAL STRENGTH ENSURE AT SHIFTING OF A HEAVY CARGO

**Antonenko Sergey Vladimirovich**, professor, Dr.Sci.Tech.,  
 professor of Ship building and ocean engineering department  
 Far Eastern Federal University, School of Engineering, Ship building  
 and ocean engineering department  
 Vladivostok, Russia  
 E-mail: antonenko48@rambler.ru

**Kitaev Maxim Vladimirovich**, Dh.D.,  
 Lecturer of Ship building and ocean engineering department  
 Far Eastern Federal University, School of Engineering, Ship building  
 and ocean engineering department  
 Vladivostok, Russia  
 E-mail: v\_bugaev@mail.ru

**Nemkin Dmitry Victorovich**, Master degree  
 Graduate student of Ship building and ocean engineering department  
 Far Eastern Federal University, School of Engineering, Ship building  
 and ocean engineering department  
 Vladivostok, Russia  
 E-mail: vlad\_2008@inbox.ru

## ABSTRACTS

The transportation of heavy large-size cargo is technically challenging. This problem has arisen in connection with the delivery of the equipment for the refinery in Komsomolsk-on-Amur. The transportation is carried out using non-self-propelled barges with the equipment located on their decks. To unload it on the shore the construction of the slipway is arranged. The paper presents the issues of ensuring the structural integrity of the barge and the slipway in the process of unloading.

The calculations are performed according to the scheme of the beam lying with an initial clearance on yielding supports. The method of five moments was used for the calculations. The options are considered for the barge to be ballasted during the lifting to the slipway.

The results of load calculations for slipway trucks when lifting the barge with heavy large-size cargo and when shifting the cargo from the barge onto the coastal area. Practical recommendations based on the results of the calculations are reported. The brief information about the operation to unload the equipment ashore is provided.

**Key words:** barge, slipway, slipway truck, reactions, shifting, heavy large-size cargo.

## Введение

Россия обладает большими запасами нефти. Экспорт сырой нефти является одним из важнейших источников доходов государства. Но важной задачей является глубокая переработка нефти с получением высококачественной продукции, стоимость которой значительно выше, чем сырой нефти. Эта продукция востребована в России и может экспортиться в другие страны.

В 1942 г. был введен в строй Комсомольский-на-Амуре нефтеперерабатывающий завод [1]. В настоящее время он является одним из основных поставщиков нефтепродуктов на рынок Дальнего Востока, его мощность по состоянию на 2012 г. составляла 8 млн т в год. В 2012 г. закончена реконструкция установки каталитического риформинга; реализация этого проекта позволит перейти на выпуск автомобильных бензинов, соответствующих экологическим классам 4 и 5. Были начаты строительно-монтажные работы по «нулевому циклу» установок комплекса гидрокрекинга.

Для этого комплекса в Японии было заказано крупногабаритное и тяжеловесное оборудование. Самым крупным изделием является реактор R-3201, габаритные размеры которого составляют  $45,6 \cdot 8,7 \cdot 7,65$  м, а масса нетто – 1243 т. Транспортировку планировалось осуществлять следующим образом. От места изготовления оборудование перевозится на крановом судне, затем оно перегружается на специально приспособленные

несамоходные баржи пр. 16800, которые буксируются вверх по Амуру. На палубах барж в заранее определенных местах устанавливаются специальные опоры, на которых закрепляются реакторы. Под наибольшим реактором предусматривалось установить 5 опор. В районе Комсомольска-на-Амуре сооружается слип, оборудованный косяковыми тележками. Баржа с реактором поднимается на слип, на палубу баржи заезжает судопоезд (транспортный модуль массой 222 т), с помощью гидравлических домкратов поднимает реактор вместе с транспортными опорами и выкатывает его на береговую площадку. Далее транспортировка производится по суше.

Поперечный слип был спроектирован ЛенморНИИпроектом и имел 11 дорожек, по которым с помощью лебёдок перемещаются косяковые тележки грузоподъёмностью 300 т. Японской стороной были выполнены предварительные расчёты реакций опор, установленных на баржах, в предположении абсолютной жёсткости конструкций опор. Реактор рассматривался как призматическая упругая балка, но момент инерции её сечения был завышен. В свою очередь, Ленгипротранс выполнил расчёты реакций тележек слипа, но при весьма нестрогих допущениях.

Проект модернизации конструкции барж был разработан ДНИИМФ, там же были выполнены расчёты нагрузки, удифферентовки, общей и местной прочности баржи. Автору было предложено выполнить расчёты реакций тележек при

установке реактора R-3201 на баржу и поэтапные расчёты реакций тележек слипа в процессе передвижки судопоезда с реактором на береговую площадку. Результаты этих расчётов представлены в данной работе.

## 1. Основные исходные данные

Баржа-площадка МП-2812, предназначенная для транспортировки реактора R-3201, имеет следующие характеристики:

- длина наибольшая – 101,8 м;
- длина между перпендикулярами – 98,0 м;
- ширина – 16,5 м;
- высота борта на миделе – 2,8 м;
- осадка по летнюю ватерлинию – 1,43 м;
- водоизмещение при этой осадке – 2239 т.

При перевозке груза:

- осадка носом – 1,35 м;
- осадка кормой – 1,72 м;
- водоизмещение – 2431 т.

11 дорожек слипа располагались с переменным шагом, в средней части составляющим 6,5 м. Абсцисса крайней кормовой тележки по отношению к мидель-шпангоуту баржи составляла -39,8 м, носовой - +33,3 м. Таким образом, носовая и кормовая оконечности баржи свешивались за пределы слипа.

Нагрузка масс баржи без реактора принималась по данным проектанта. Момент инерции миделевого сечения по расчёту эквивалентного бруса составил  $0,883 \text{ м}^4$ ; ввиду наличия протяжённой цилиндрической вставки он принимался постоянным по всей длине. Кстати, для реактора он оказался равным  $9,08 \text{ м}^4$ . Коэффициент жёсткости тележки слипа принимался, в соответствии с проектными данными, 9,582 т/мм. Положение реактора на барже было указано в чертеже проектанта.

Выгрузка реактора должна была производиться вдоль баржи (в сторону её кормы). В ходе передвижки массивный реактор, смещаясь вдоль баржи, нагружал кормовые тележки, тогда как носовые разгружались. Чтобы избежать недопустимой перегрузки тележек слипа, расположенных в корме баржи, проектант предложил сразу после подъёма баржи в верхнее положение подвести под её корму (на расстояниях 3,83 м и 8,83 м от кормовой тележки) 6 пар тумб с опорной площадью  $1,26 \text{ м}^2$  каждая, которые должны были принять на себя нагрузку от реактора. Коэффициент жёсткости группы из 6 тумб, по расчёту проектанта, составлял 61,16 т/мм.

## 2. Принципиальная схема расчёта и предварительные результаты

Баржа рассчитывалась как неразрезная многоопорная балка, лежащая на неравноотстоящих податливых опорах, которыми являются косяковые тележки слипа, и загруженная силами веса самой баржи и реактора, а также концевыми моментами от свешивающихся оконечностей за пределами тележек слипа. Для расчёта использовался метод

пяти моментов, являющийся классическим для такой расчётной схемы. Нагрузка прикладывалась непосредственно к опорам, что упрощало систему уравнений пяти моментов. Изгиб баржи между тележками слипа при этом не учитывался, но он не оказывает сколько-нибудь существенного влияния. Вычислительный алгоритм предусматривает возможность учёта как строительной погиби судна, так и отклонений опор от горизонта. Общее описание использованного алгоритма дано в [2, с. 94–97]. Расчёты выполнялись с помощью электронных таблиц Excel.

В вышеупомянутых расчётах проектанта не было принято во внимание то обстоятельство, что тумбы подводились под корпус баржи в её изогнутом состоянии. Учитывая гибкость баржи, это могло оказать заметное влияние на распределение опорных реакций. Очевидно, введение в расчёт реакций перед началом передвижки этих тумб приводило к тому, что они брали на себя нагрузку от кормового свеса, разгружая тележки слипа, тогда как фактически этого не было. Отказ от учёта тумб, наоборот, приводил к появлению недопустимых реакций кормовых тележек в ходе передвижки. Следовательно, требовалось вначале найти исходную форму упругой линии баржи и установить тумбы с таким начальным зазором, чтобы в момент начала передвижки они не создавали реакций.

В первой, предварительной серии расчётов нами было рассмотрено несколько вариантов. В первом варианте в нагрузку баржи был включён балласт, принимаемый на переход (в носу – 130 т, в корме – 200 т). Перед подъёмом на слип этот балласт удалялся, поэтому в основном варианте он не учитывался. Рассматривались варианты как с включением изгибной жёсткости реактора, так и без неё. В исходном положении баржа поднята на слипе, в корме установлены тумбы, не несущие нагрузки. Нагрузка на баржу от реактора передаётся через пять транспортных опор. Распределение реакций этих опор, вообще говоря, неопределённое (напомним, что в японских расчётах эти реакции были найдены для случая абсолютно жёстких опор). В начале передвижки на палубу баржи накатывается транспортный модуль массой 222 т. После пересадки реактора на транспортный модуль баржа загружается реакциями его колёс, которые распределены практически равномерно. Далее рассмотрены 6 положений транспортного модуля с реактором, со смещением в каждом положении на 2 теоретические шпации баржи, т.е. на 9,8 м, по отношению к предыдущему положению. В последнем положении последняя опора реактора находится в точке, соответствующей 21-му теоретическому шпангоуту баржи; в этой точке заканчивается аппарель и со стороны реактора на баржу не передаётся никакой нагрузки.

Расчёты позволили построить эпюры изгибающих моментов в корпусе баржи, реакций тележек слипа и упругие линии баржи для разных положений транспортного модуля с реактором по отношению к барже.

Было показано, что, несмотря на малую высоту борта баржи и значительные свесы её оконечностей, общая продольная прочность корпуса достаточная. Наибольшие реакции действуют на средние тележки слипа (над которыми располагается реактор) на начальной стадии передвижки и достигают 290 т, что не превышает допускаемой величины 300 т.

В выводах обращалось внимание на то, что на распределение реакций тележек слипа могут влиять различные факторы, в том числе строительная погиб килевой линии баржи, неизбежные отклонения высот опорной поверхности тележек слипа от теоретического положения, неровности рельсовых путей. Также будут влиять реальные значения коэффициентов жёсткости тележек слипа и опорных тумб (с учётом жёсткости основания под ними), которые зависят от конструкции податливых элементов – деревянных подушек.

В отчёте, который был выпущен по результатам этой серии расчётов, было высказано пожелание проектанту слипа откорректировать положение баржи в связи с тем, что в первоначальном варианте абсцисса центра тяжести баржи с реактором (-3,02 м) заметно отличалась от абсциссы центра тяги лебёдок слипа (-5,87 м), что, как отмечается в специальной литературе, могло привести к неблагоприятным последствиям. Менее нагруженные лебёдки будут тянуть тележки быстрее, чем более нагруженные, что может привести к перекосу судна и вызвать или сход тележек с рельсов, или сдвиг рельсовых путей. В связи с этим проектант произвёл соответствующую корректировку. Было изменено расположение дорожек слипа, а для уменьшения эксцентриситета было предложено не удалять полностью балласт, а оставить 70 т балласта в крайнем кормовом отсеке.

Также обращалось внимание на то, что конструкция тумб, устанавливаемых в кормовой части баржи перед началом передвижки реактора, должна, с одной стороны, обеспечивать выполнение условий местной прочности днища баржи (для этого их прочность не должна быть избыточной), с другой, не допускать перегрузки тележек слипа в процессе передвижки (для этого они должны иметь достаточную жёсткость). Эти два требования в некоторой мере противоречат друг другу, что требует внимательной проработки конструкции тумб.

### 3. Расчётные варианты

Во второй (основной) серии расчётов для каждого из принятых для анализа варианта рассматривались, как и прежде, баржа с реактором в поднятом на слип положении, то же с транспортным модулем, 6 положений при передвижке судопоезда с реактором на 9,8; 19,6; 29,4; 39,2; 49,0 и 58,8 м.

Было принято во внимание, что изгибная жёсткость реактора на порядок выше, чем баржи, конструкция крепления реактора к барже жёсткая,

так что они на участке между крайними (из пяти) опорами практически изгибаются совместно. Указанные выше обстоятельства не позволяют уверенно определить реакции опор, которые крепят реактор к барже, поэтому желательно оценить возможный диапазон изменения напряжённо-деформированного состояния системы баржа – опоры – реактор.

Расчёт баржи с установленным на ней реактором в исходном положении (до начала передвижки, без транспортного модуля) сводился к расчёту баржи, загруженной силами собственного веса, включая вес балласта, остающегося в процессе подъёма на слип, и реакциями опор реактора. Эти нагрузки уравновешиваются реакциями тележек слипа. После того, как реактор будет приподнят над палубой баржи гидродомкратами транспортного модуля, нагрузка на баржу будет передаваться колёсами последнего.

В процессе передвижки нагрузка на баржу принималась состоящей из двух слагаемых: постоянного веса баржи с остаточным балластом и переменной (подвижной) нагрузки от движущегося транспортного модуля с реактором.

Количество податливых опор принималось равным 13, включая 11 тележек слипа и две группы из 6 тумб каждая. В исходном положении тумбы не загружены, они начинают работать только после накатки транспортного модуля.

В основном варианте реакции пяти опор реактора определялись по схеме жёсткого штампа. Дополнительно рассматривались два гипотетических неблагоприятных случая:

- 1) из 5 опор реактора две крайние не загружены, три средние загружены равномерно;
- 2) средняя опора не загружена, нагрузка на опоры № 2 и 4 в два раза меньше, чем на концевые опоры № 1 и 5.

Кроме того, было проанализировано влияние жёсткости реактора при изгибе на напряжённо-деформированное состояние системы.

### 5. Основные результаты расчётов

На рис. 1–3 приведены кривые изгибающих моментов в корпусе баржи, реакций тележек слипа и упругой линии баржи при различных положениях судопоезда в процессе передвижки. По оси абсцисс отложены расстояния от миделя баржи в метрах, цифры в легенде указывают перемещение судопоезда относительно первоначального положения в метрах. За единицу измерения силы здесь и далее принята тонна силы, равная 9,81 кН.

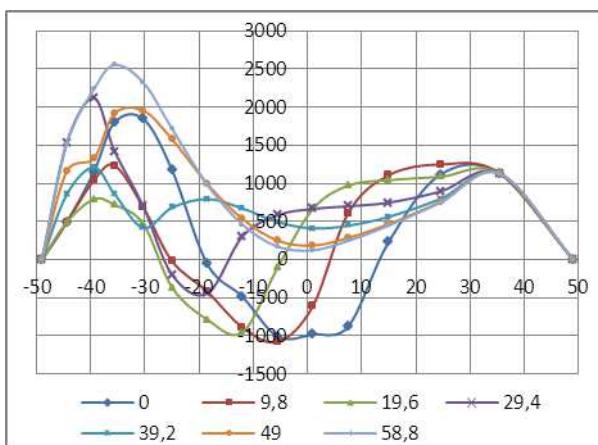


Рис. 1. Изменение изгибающих моментов в барже при передвижке, тм

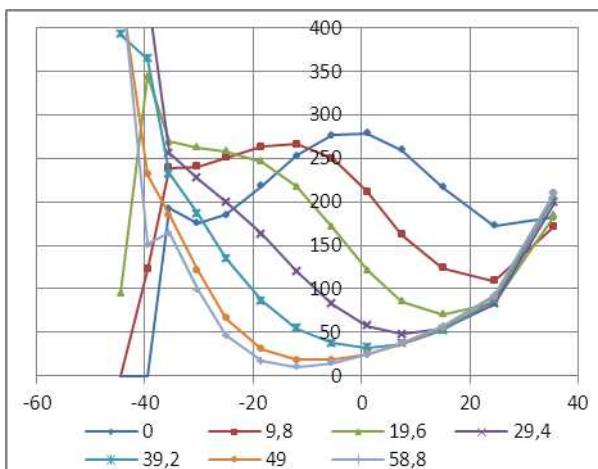


Рис. 2. Динамика изменения реакций тележек при передвижке, т

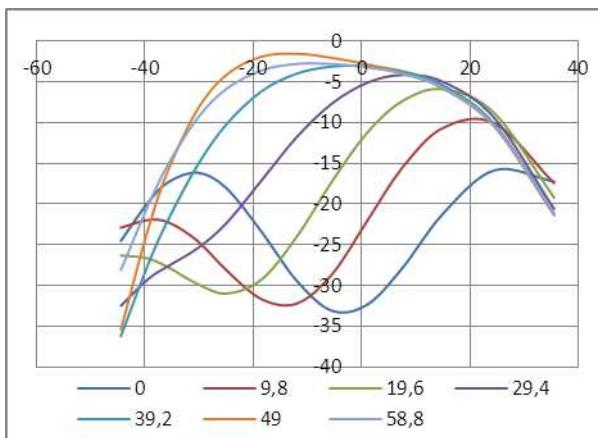


Рис. 3. Изгиб корпуса баржи при передвижке, мм

Напомним, что две кормовые опоры представляют собой не тележки слипа, допускаемая нагрузка на которые составляет 300 т, а группу из 6 тумб, для которой допускается суммарная нагрузка 1200 т.

Из-за свешивающихся оконечностей в исходном положении в районе крайних тележек слипа, особенно в корме, возникают повышенные пере-

гибающие моменты. В средней же части момент имеет противоположный знак.

В процессе передвижки характер эпюры изгибающих моментов существенно изменяется, но они не превышают допускаемой величины.

Реакции тележек слипа в исходном положении, когда массивный реактор располагается в средней части баржи, имеют максимальную величину на миделе. При передвижке тенденция к прогибу сменяется на противоположную, и перед выходом судопоезда на берег средние тележки почти не загружены. Реакции не превышают допускаемую величину, хотя и приближаются к ней.

Рис. 4–6 по содержанию аналогичны рис. 1–3, но получены в предположении, что из пяти транспортных опор реактора загружены только три средние (здесь условно принималось, что при передвижке нагрузка на баржу передаётся через эти опоры).

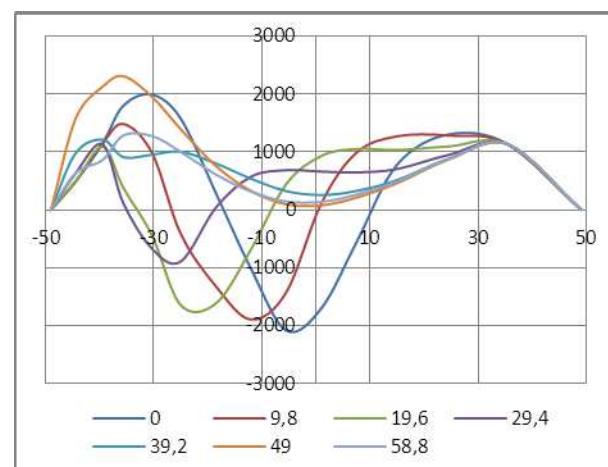


Рис. 4. Изменение изгибающих моментов в барже при передвижке (крайние опоры не работают)

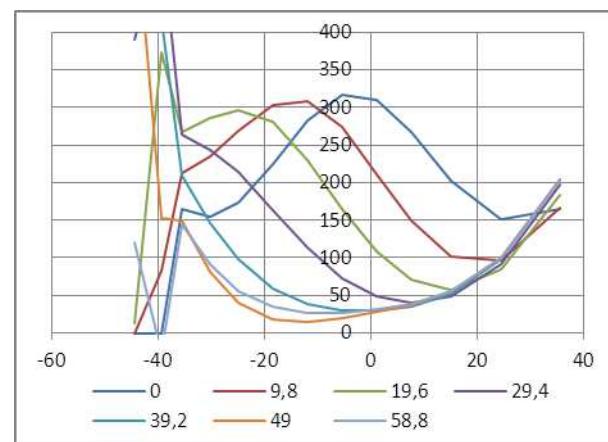


Рис. 5. Реакции тележек слипа при передвижке (крайние опоры не работают)

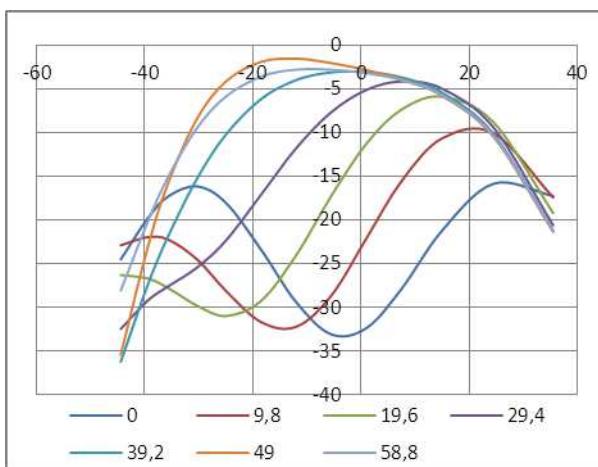


Рис. 6. Изгиб корпуса баржи при передвижке (крайние опоры не работают)

На рис. 7–9 показаны кривые изгибающих моментов, реакций тележек слипа и изгиба корпуса баржи для противоположного случая – когда не работает средняя транспортная опора, тогда как концевые (№ 1 и 5) загружены вдвое сильнее, чем опоры № 2 и 4.

Сопоставление результатов показывает, что и величина, и общий характер изменения реакций тележек слипа в результате перераспределения нагрузок со стороны реактора радикально не изменяются. В процессе передвижки корпус баржи испытывает преимущественно деформации перегиба, поэтому перегрузка концевых опор реактора более опасна, чем их недогрузка. Но при перегибе баржи следует ожидать, что именно средние опоры реактора будут создавать повышенные нагрузки на баржу.

Влияние изгибайной жёсткости корпуса реактора иллюстрируют рис. 10–12. Протяжённость участка баржи, где корпуса самой баржи и реактора работают совместно, сравнительно невелика – около 20 % длины баржи.

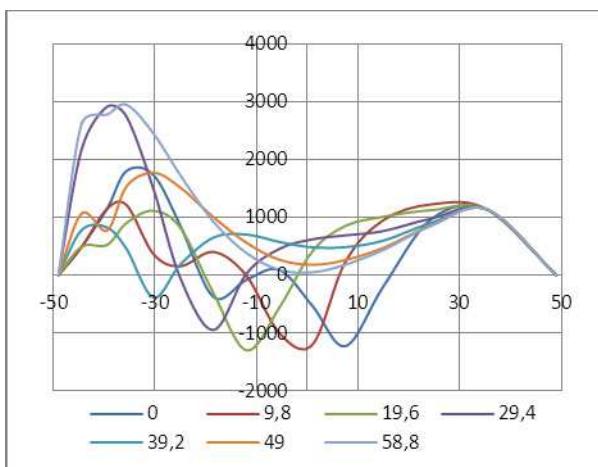


Рис. 7. Изменение изгибающих моментов в барже при передвижке (средняя опора не работает)

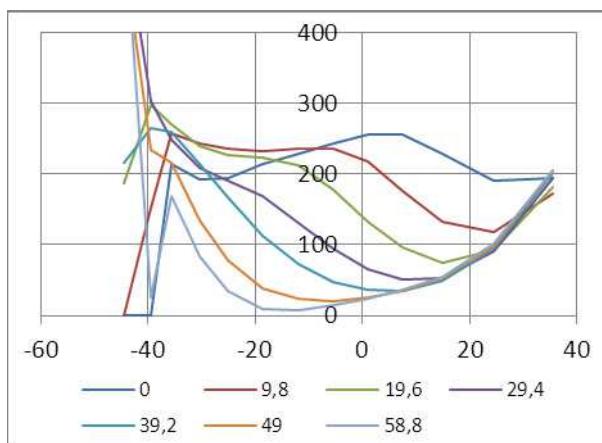


Рис. 8. Реакции тележек слипа при передвижке (средняя опора не работает)

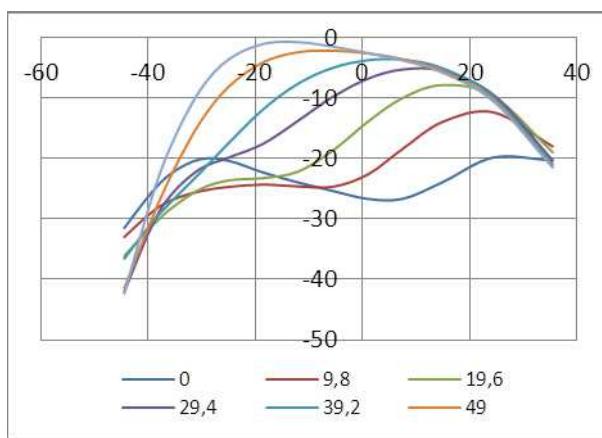


Рис. 9. Изгиб корпуса баржи при передвижке (с включением реактора)

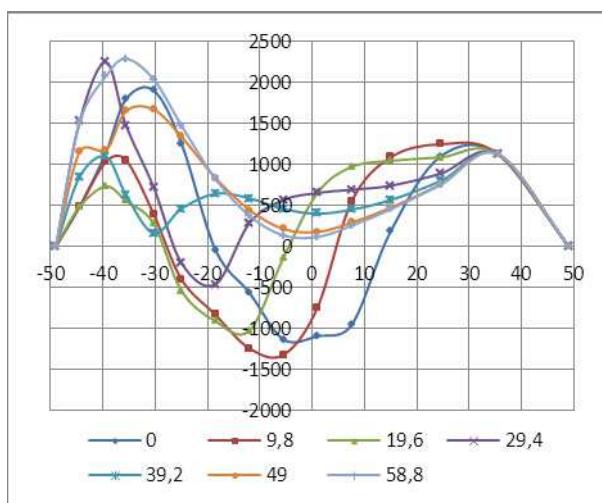


Рис. 10. Изменение изгибающих моментов в барже при передвижке (средняя опора не работает)

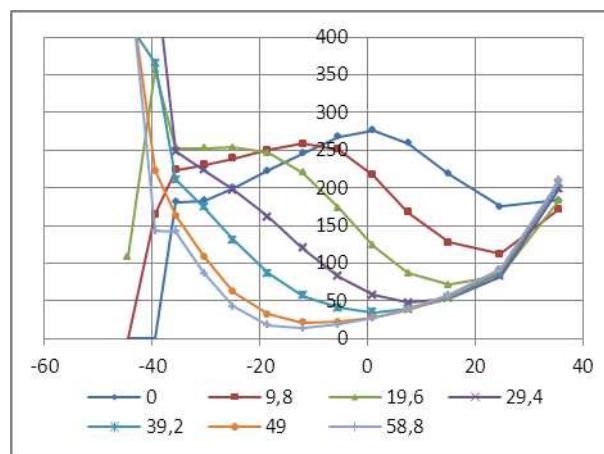


Рис. 11. Реакции тележек слипа при передвижке (с включением реактора)

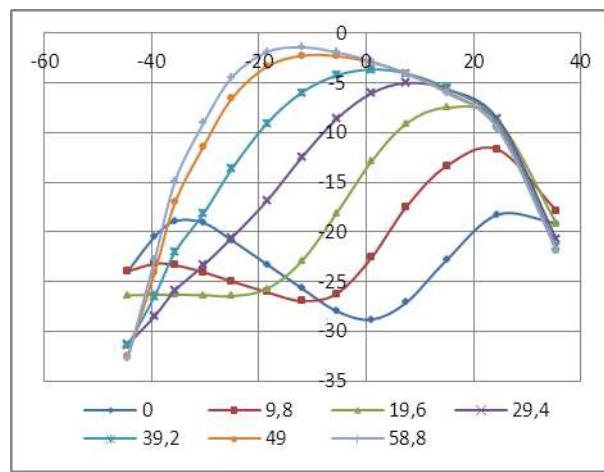


Рис. 12. Изгиб корпуса баржи при передвижке (с включением реактора)

Расчёты показали, что учёт изгибной жёсткости реактора (совместного изгиба баржи и реактора – ср. рис. 1–3 и 10–12) приводит лишь к небольшим изменениям напряжённо-деформированного состояния системы. Несколько снижается максимальное значение изгибающего момента в корме, а в носу немного увеличивается. Максимальная реакция тележки слипа практически не изменяется. На рис. 12 с трудом улавливаются почти прямолинейные участки упругой линии в районе расположения реактора (который постепенно сдвигается в корму, т.е. влево на рисунках).

### Заключение

Баржа имеет значительную гибкость, форма упругой линии её в процессе передвижки изменяется в широких пределах. Для самой баржи это не представляет опасности. Но необходимо иметь в виду, что предварительные расчёты не позволяют учсть названные выше факторы, которые будут проявляться в реальных условиях и могут сыграть заметную роль.

Для компенсации возможного вредного влияния этих факторов необходимо предусмотреть соответствующие меры. Один из основополагающих принципов, как известно, можно назвать принципом «слабого звена»: при случайных перегрузках, возможность которых всегда нужно иметь в виду, должен в первую очередь повреждаться наиболее слабый, дешёвый и легко заменяемый элемент, которым в данном случае может быть деревянная подушка опор. Для этого несущая способность подушки должна быть заведомо меньше, чем несущая способность конструкций днища баржи и слипа.

Проектом предусмотрена большая (свыше 10 м<sup>2</sup>) площадь деревянной подушки на каждой тележке слипа. Несущая способность деревянной подушки составляет около 2000 т, хотя по проекту допускаемая нагрузка на тележку всего лишь 300 т. Высота подушки при этом 150–200 мм, что способствует неравномерному распределению нагрузок на тележки слипа и возможным перегрузкам. Для обеспечения безопасности при работе слипа это несоответствие следовало бы устранить, укладывая брусья подушки с промежутками.

Сообщается [3], что «подъёмы первой и второй барж с реакторами Р-3101, Р-3002 и Р-3103 прошли без задержек и в срок. А вот подъём третьей баржи с четвёртым реактором Р-3201 весом 1250 тонн пришлось осуществлять уже в условиях ледостава Амура. Баржа освобождалась от постоянно образовывавшихся ледяных торосов, что и без того усугубляло процесс подъёма плавсредства, имевшего разную осадку по корме и носу с наклоном в одну сторону. В таком виде было тяжело разместить баржу на систему тележек. Пришлось привлекать работников КНПЗ и подрядных организаций для обеспечения безопасности проводимой операции».

Кстати, по имеющейся информации подъём сопровождался некоторым перекосом тележек слипа. На эту опасность мы указывали (см. раздел 3). Но в конечном итоге работа была успешно завершена. Заметим, что специалисты из Владивостока, выполнившие расчёты, не были приглашены на операцию подъёма реакторов, хотя, как показывает практика, это помогает оперативному решению вопросов, которые могут появиться в ходе работы, а также способствует повышению квалификации привлекаемых экспертов.

«Дальнейшая доставка и сборка реакторов на подготовленные фундаменты секции гидрокрекинга-гидроочистки будет осуществлена до конца этого года. А в 2016 году, когда этот комплекс будет введён в эксплуатацию, КНПЗ станет одним из самых современных нефтеперерабатывающих заводов в России...» [3].

*Работа выполнена в рамках госзадания Министерства образования и науки России, проект 543.*

### Литература

1. [www.rosneft.ru/Downstream/refining/Refineries/Komsomolsk\\_Refinery/](http://www.rosneft.ru/Downstream/refining/Refineries/Komsomolsk_Refinery/)
2. Справочник по строительной механике корабля / Бойцов Г.В., Палий О.М., Чувиковский В.С. В трёх томах. Том 1. Общие понятия. Стержни. Стержневые системы и перекрытия. – Л.: Судостроение, 1982. 376 с.
3. [http://www.toz.khv.ru/newspaper/podrobnosti/komsomolskiy\\_na\\_amure\\_neftezavod\\_nichego\\_ne\\_skryvaet/](http://www.toz.khv.ru/newspaper/podrobnosti/komsomolskiy_na_amure_neftezavod_nichego_ne_skryvaet/) (Тихоокеанская звезда 19.7.2014).

### References

1. [www.rosneft.ru/Downstream/refining/Refineries/Komsomolsk\\_Refinery/](http://www.rosneft.ru/Downstream/refining/Refineries/Komsomolsk_Refinery/)
2. Spravochnik po stroitel'noj mehanike korablja. Bojcov G.V., Palij O.M., Chuvikovskij V.S. V trjoh tomah. Tom 1. Obshchie ponjatija. Sterzhni. Sterzhnevye sistemy i perekrytija. L.: Sudostroenie, 1982. 376 s.
3. [http://www.toz.khv.ru/newspaper/podrobnosti/komsomolskiy\\_na\\_amure\\_neftezavod\\_nichego\\_ne\\_skryvaet/](http://www.toz.khv.ru/newspaper/podrobnosti/komsomolskiy_na_amure_neftezavod_nichego_ne_skryvaet/) (Tihookeanskaja zvezda 19.7.2014).

УДК 004.942:004.031.043

## ВЛИЯНИЕ МЕЛКОЙ ВОДЫ НА МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СКОРОСТНЫХ КАТАМАРАНОВ

**Ляховицкий Анатолий Григорьевич**, доктор технических наук, профессор  
 Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет  
 E-mail: neverreturner@gmail.com  
 Санкт-Петербург, Россия

**Лвин Мин Кхант**, аспирант,  
 Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет  
 E-mail: neverreturner@gmail.com  
 Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются некоторые проблемы мореходных качеств скоростных катамаранов, предназначенных для эксплуатации по мелководным фарватерам. Мореходные качества скоростных катамаранов рассмотрены в историческом аспекте от времен античности до наших дней. Дано описание десантного катамарана, который был использован древними римлянами. Описаны катамараны жителей Океании, королевский катамаран Бирмы и современный пассажирский катамаран, используемый в Российской Федерации. Оценивается влияние мелководья при их проектировании. Показано изменение волнового сопротивления на мелкой воде при увеличении скорости хода. Волновое сопротивление достигает максимальной величины при так называемой критической скорости. После ее преодоления судно движется в зоне сверхкритических скоростей и сохраняет постоянную проектную скорость при любой глубине фарватера, включая глубокую воду. Выполнена оценка целесообразности создания скоростных пассажирских катамаранов для внутренних водных путей Союза Мьянма с учетом опыта России в научных исследованиях, проектировании, строительстве и эксплуатации судов такого типа.

**Ключевые слова:** мелкая вода, мореходные качества, сопротивление, скорость, проектирование, катамаран.

## INFLUENCE OF SHALLOW WATER ON SEAWORTHINESS OF HIGH SPEED CATAMARANS

**Lyakhovitsky Anatoly Grigorievich**, Professor, Dr. Sci. Tech.  
 State Marine Technical University of St. Petersburg  
 E-mail: neverreturner@gmail.com  
 Sankt-Petersburg, Russia

**Lwin Min Khant**, Postgraduate  
 State Marine Technical University of St. Petersburg  
 E-mail: neverreturner@gmail.com  
 Sankt-Petersburg, Russia

### ABSTRACT

The article describes some seaworthiness problems of high speed catamarans, intended for operation in shallow water fairways. Seaworthiness problems of high speed catamarans had been considered in historical aspect from antiquity to nowadays. The description of the landing catamaran which was used by ancient Romans is given. Catamarans of Oceania inhabitants, Burma royal catamaran and modern passenger catamaran used in Russia Federation are described. The influence of shallow water in their design is rated. Change of wave resistance in shallow water at increasing speed has been shown. The wave resistance reaches its maximum value at so-called critical speed. After overcoming this speed, the vessel moves to the supercritical speed zone and maintains the constant design speed at any depth of the fairway including deep water. The assessment of the suitability of establishing high speed catamarans for Inland Waterways of the Union of Myanmar is carried out with account taken of Russian experience in scientific research, design, construction and operation of this kind of vessel.

**Key words:** Shallow water, seaworthiness, resistance, speed, design, catamaran.

## Введение

В последние годы во многих странах мира проявляется интерес к проектированию много корпусных судов (МС). Среди них наибольшее распространение получили скоростные катамараны [3]. Различные типы МС находятся в разной стадии развития: проводятся исследовательские и проектные работы, осуществляется их постройка и эксплуатация.

Мореходные качества скоростных катамаранов (СК) играют существенную роль в интересе к ним, который повлиял на широкое распространение катамаранов среди пассажирских коммерческих судов. Особенности катамаранов, отличающие их от однокорпусных судов, подробно указаны в работе [4].

Известно, что эксплуатация судов по фарватерам с малыми глубинами воды приводит к существенному изменению их мореходных качеств, что объясняется влиянием дна водоема на характеристики течения, вызываемого движущимся судном [7]. Это влияние обнаруживается в изменении распределения гидродинамических давлений по смоченной поверхности судна. Вследствие чего изменяются и действующие на судно внешние гидродинамические силы. Эти внешние силы определяют мореходные качества судна. Обратное влияние самого движущегося судна на окружающую его водную среду также изменяется в условиях мелкой воды. Особенности гидродинамики судов при движении по внутренним водным путям достаточно подробно изложены в работе [1]. Рассмотрение концептуальных проектных решений по МС свидетельствует о новых возможностях обеспечения мореходных качеств, не реализуемых на традиционных однокорпусных судах [5]. Особые мореходные качества катамаранов использовались в разных странах с древних времен. В СССР были построены катамараны для пассажирских перевозок и мониторинга окружающей среды. Планируется использовать пассажирские катамараны в Российской Федерации на пригородных линиях в Санкт-Петербурге и на Черном море. Представляется целесообразным использование скоростных катамаранов на внутренних водных путях Союза Мьянма.

## 2. Краткая история использования мореходных качеств катамаранов

Мореходные качества катамаранов использовали интуитивно с древнейших времен, когда еще сама наука - теория корабля не была разработана. Одним из важных мореходных качеств катамаранов является повышенная остойчивость. Это качество использовали, создавая такие суда.

Одним из первых упоминаний о катамаранах можно считать древнеримский катамаран, который использовали как десантный корабль [4]. В носовой оконечности корабля на соединительном мосту была установлена высокая лестница с платформой наверху (рис.1).

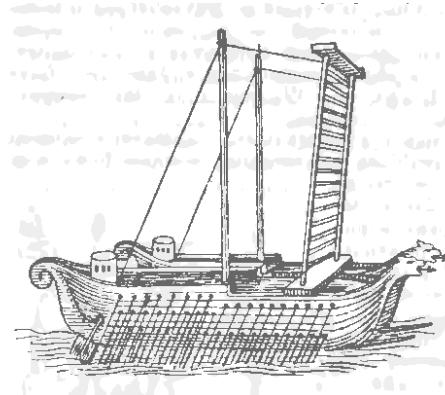


Рис.1. Древнеримский катамаран

Эта конструкция была применена для захвата воинами с моря крепостных стен противника. Римляне интуитивно использовали мореходное качество остойчивость, не владея знаниями ооперечной метацентрической высоте судов. Практическое применение катамарана без хода во время боевой операции не было связано с влиянием мелкой воды, которое проявляется при движении судна, но была использована повышенная остойчивость катамарана.

Жители Океании обнаружили повышенные ходовые качества и меньшее сопротивление воды движению катамаранов в период, начиная с X века. Они использовали катамараны (рис. 2) как разведывательные и скоростные суда.

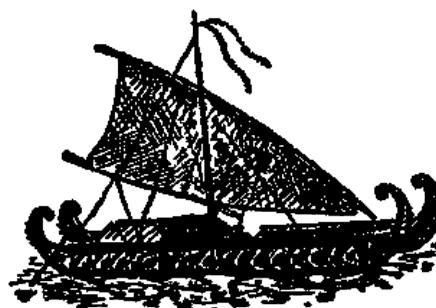


Рис.2. Катамаран жителей Океании

В Бирме (ныне Союз Мьянма) так называемые королевские катамараны (рис. 3) были построены и использовались королями страны в XVII веке. Катамараны были предназначены для перевозок в религиозных целях. Короли катались на них и осматривали достопримечательности страны. Корпуса катамаранов были построены в форме птицы Гаруды. По древней мифологии царь золотой птицы назывался "Хин Тар". Надстройка такого катамарана была построена как королевский дворец. Ее возвышение свидетельствует о том, что интуитивно бирманцы, также как и древние римляне, использовали особенности мореходного качества такого судна – повышенную остойчивость.



Рис. 3. Королевский катамаран Бирмы

Интерес к СК в наше время также связан с особенностями их мореходных и общепроектных качеств. Для современных пассажирских катамаранов характерны возможность обеспечения высоких скоростей и вместимости, улучшение комфорта для пассажиров. Используются такие мореходные качества катамаранов, как остойчивость и ходкость.

Современный пассажирский скоростной катамаран, используемый в Российской Федерации, показан на рис. 4. Он развивает скорость 34 узла, может использовать экономичный режим со скоростью 20 узлов.

а)



б)

Рис. 4. Современный пассажирский катамаран:  
а) судно без хода; б) судно на ходу

### 3. Влияние мелкой воды на мореходные качества катамаранов

Мелкая вода оказывает влияние на мореходные качества судов. Подробное изложение информации о влиянии мелководья на сопротивление движению судов, изменении их посадки на ходу, на работу двигателя и его взаимодействие с корпусом, качку и управляемость содержится в работе [6]. При проектировании СК возникает вопрос о выборе скоростного режима для проекти-

руемого катамарана, который планируется использовать на внутренних водных путях ограниченной глубины. Эту задачу следует решать с учетом влияния мелководья на его мореходные качества. Степень влияния мелководья на сопротивление движению судна зависит от соотношения между размерами его корпуса и глубиной воды, а также от относительной скорости движения и в некоторой мере от формы обводов судна. Для количественной оценки степени влияния мелководья обычно используются следующие безразмерные параметры:

– отношение глубины воды  $h$  к осадке  $T$  или длине судна  $L$ :  $h/T$  или  $h/L$ , характеризующие степень ограниченности фарватера по глубине;

– число Фруда по глубине  $Fn_h$ , или относительную скорость движения судна в условиях ограниченной глубины

$$Fn_h = \frac{v}{\sqrt{gh}} = \sqrt{\frac{L}{h}} Fn, \quad (1)$$

где число Фруда  $Fn = \frac{v}{\sqrt{gL}}$ .

При проектировании судов требуется обеспечить им сохранение проектной и практически постоянной достаточно высокой скорости хода при различных глубинах фарватера, которые могут встретиться в реальных условиях эксплуатации проектируемых судов.

При создании в СССР в 60-х – 70-х годах прошлого века судов для внутренних водных путей были выполнены исследования, показавшие, что если спроектировать судно на скорость, соответствующую  $Fn > 0,5$ , то оно будет иметь практически постоянную скорость на всех глубинах, поскольку мелководные горбы на кривых сопротивления воды всегда находятся при меньших скоростях. Типичные зависимости волнового сопротивления  $R_w$ , одной из испытанных моделей, в зависимости от скорости  $v_0$  на различных относительных глубинах воды  $h_L$  показаны на рис. 5.

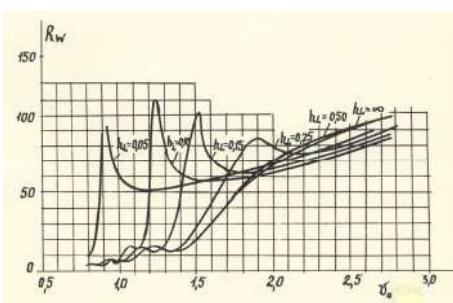


Рис. 5. Кривые зависимости волнового сопротивления модели судна от скорости при различных относительных глубинах воды

Ограниченнная глубина фарватера влияет на все составляющие сопротивления воды движе-

нию судна, однако степень их изменения в условиях мелководья по сравнению со случаем движения судна на глубокой воде оказывается различной. Изменение вязкостных составляющих сопротивления воды (сопротивления трения и сопротивления формы) при движении судна в условиях ограниченной глубины фарватера связано с возрастанием местных скоростей обтекания корпуса из-за влияния дна водоема. При относительных глубинах  $\frac{h}{T} > 2$  это изменение неизначительно. При дальнейшем уменьшении глубины воды до значений  $\frac{h}{T} \leq 1.5$  вязкостное со-

противление может возрасти на 10 – 15 % по сравнению с его величиной для случая движения судна с теми же скоростями на глубокой воде. Поскольку вязкостное сопротивление, как на глубокой, так и на мелкой воде приблизительно пропорционально квадрату скорости, то относительное возрастание этого сопротивления на мелководье практически не зависит от скорости.

Наиболее сильно влияние мелководья сказывается на величине и характере изменения волнового сопротивления. Выражение для волнового сопротивления имеет вид:

$$R_w = c_w \frac{\rho v^2}{2} S, \quad (2)$$

где  $c_w$  – безразмерный коэффициент волнового сопротивления.

Изменение безразмерного коэффициента волнового сопротивления от числа Фруда на разных относительных глубинах по данным проведенных исследований показано на рис. 6.

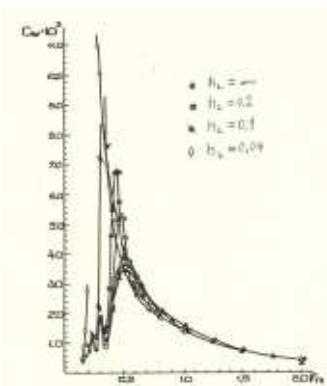


Рис. 6. Влияние мелкой воды на коэффициент волнового сопротивления

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований, включая натурные испытания скоростных катамаранов, показали, что, как представлено на рис. 6, все мелководные горбы волнового сопротивления возникают при  $Fn < 0,5$ .

Резкое изменение волнового сопротивления связано с различием свойств, которыми облада-

ют корабельные волны, образующиеся на глубокой и мелкой воде.

Предельная скорость распространения попечерных волн на мелководье теоретически достигает значения  $V_{kp} = \sqrt{gh}$  и равна скорости перемещения одиночной волны, имеющей вид бугра с возвратно-поступательным движением частиц жидкости (рис. 7).



Рис. 7. Одиночная волна

На основании выполненных исследований была получена диаграмма, которую можно использовать для выбора проектной скорости катамаранов, предназначенных для эксплуатации на внутренних водных путях с различной глубиной фарватера, включая глубокую воду [7]. Эта диаграмма представлена на рис. 8.

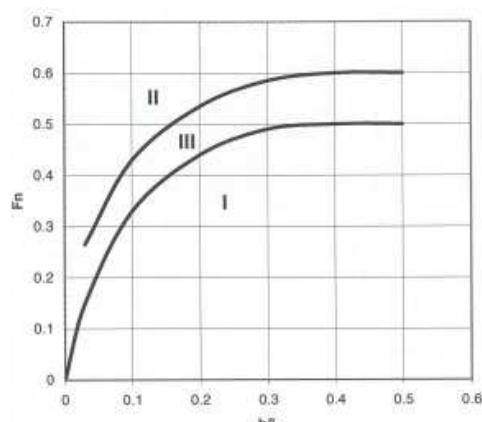


Рис. 8. Скоростные зоны:  
I – докритических скоростей;  
II – сверхкритических скоростей;  
III – неблагоприятных сверхкритических скоростей

Если спроектировать катамаран на относительную скорость  $Fn > 0,5$ , то он будет преодолевать мелководные горбы на любых глубинах и иметь практически постоянную скорость хода, независимо от глубины воды.

При проектировании судов для условий эксплуатации на мелкой воде оказалось продуктивным разделить их на две группы: суда с докритическими скоростями и суда со сверхкритическими скоростями. Для каждой из этих групп оптимальные проектные решения требуют специфического подхода.

При создании судов, предназначенных для эксплуатации на мелководных внутренних водных путях, со сверхкритическими скоростями, необходимо решение следующих проблем:

- снижение волнового сопротивления;
- перераспределение волновой и вязкостной составляющих сопротивления воды движению судов;
- оптимизация элементов теоретического чертежа;
- выбор режима эксплуатации в сверхкритической зоне;
- воздействие на сопротивление, посадку и взаимодействие движителей с корпусом судна за счет соответствующей профилировки кормовой оконечности.

Указанные исследования были проведены при создании флота для внутренних водных путей и дали положительный конечный результат [7]. Они будут справедливы не только при эксплуатации флота на внутренних водных путях, но и для других случаев движения судов на мелкой воде. В СССР была выполнена натурная проверка проведенных исследований при проектировании, постройке и последующей опытной эксплуатации скоростного пассажирского катамарана «Анатолий Угловский» (рис. 9).



Рис. 9. Скоростной катамаран «Анатолий Угловский»

Первый пассажирский катамаран со сверхкритической скоростью «Анатолий Угловский» был построен в городе Великий Устюг в 1975 году.

После постройки скоростного катамарана были проведены его натурные испытания на разных глубинах воды (рис. 10). Кривые мощности  $\Sigma N_e$ , развиваемой энергетической установкой судна, в зависимости от скорости хода  $V_k$  имеют характерные «горбы» при скоростях, близких к критической. В сверхкритической зоне на мелководье скорость хода судна несколько возрастает по сравнению с глубокой водой. Подробные результаты натурных испытаний этого скоростного катамарана содержатся в работе [6]. Анализ натурных испытаний скоростного катамарана показал, что полученные данные по гидродинамике распространяются на двухкорпусные схемы и могут

быть использованы для совершенствования скоростных катамаранов, предназначенных для эксплуатации на внутренних водных путях.

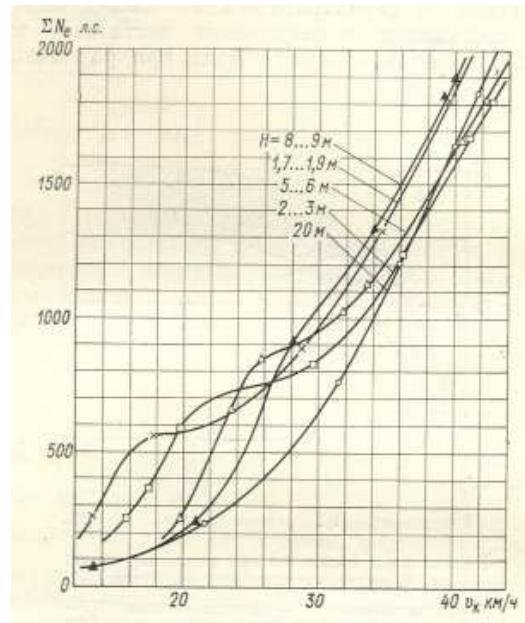


Рис. 10. Результаты натурных испытаний скоростного катамарана «Анатолий Угловский» на разных глубинах воды

#### 4. Использование скоростных катамаранов на внутренних водных путях Союза Мьянма

Опыт создания скоростного водного транспорта России полезен для Союза Мьянма, судоходные речные пути которого достигают 12,8 тыс. км. Для Союза Мьянмы, наибольший интерес представляет судоходство на главной речной артерии страны - реке Ирравади, в связи с ее исторической ролью как основного пассажирского пути. Внутренний водный транспорт основан в 1865 году, является одним из предприятий принадлежащих государству. В настоящее время он имеет 413 судов и перевозит около 15060000 пассажиров, около 2070 тысяч тонн грузов ежегодно. Однако флот страны состоит главным образом из тихоходных судов, что не может обеспечить всех потребностей в пассажироперевозках. Кроме того, в последние годы возрастает роль туристических перевозок, что требует повышенного внимания, в том числе к качественному состоянию флота. Решением этой проблемы может быть постройка и введение в эксплуатацию скоростных пассажирских катамаранов. Представляется целесообразным их использование на внутренних водных путях Союза Мьянма.

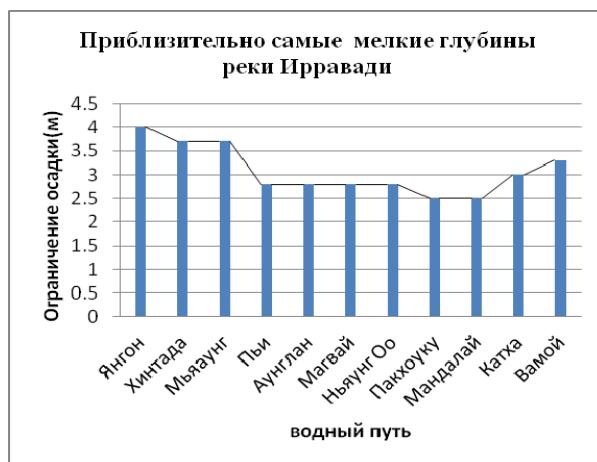


Рис. 11. Глубины воды и поселения на берегу реки Ирравади

Ограничивающим фактором навигации является недостаточная глубина в период с 15 -го ноября до 15 -го мая, в сезон засухи. На рис 11 представлены приблизительно самые мелкие глубины реки Ирравади от столицы страны Янгона до города Вамой. Вопрос о выборе скоростного режима судна, предназначенного для эксплуатации со сверхкритическими скоростями, возникает в связи с необходимостью пополнить внутренний водный транспорт Союза Мьянма скоростными судами. Скоростные катамараны должны эксплуатироваться как в условиях мелководья, так и на относительно глубокой воде. Их целесообразно проектировать на относительные скорости  $F_n > 0,60$  (рис. 8). Такая ориентировочная граничная величина относительной скорости принимается для того, чтобы при сравнительно больших глубинах фарватера судно не эксплуатировалось при неблагоприятном волновом режиме, соответствующем  $F_n \approx 0,50$  [6].

Согласно рис. 8, если глубина фарватера не превышает определенной величины, можно принимать расчетные скорости в соответствии с верхней кривой на этом рисунке, чтобы проектируемое судно находилось в зоне благоприятных сверхкритических скоростей (области II).

На рис.11 представлены приблизительные глубины реки Ирравади от Янгона до Вамой, где предполагается эксплуатировать скоростные пассажирские катамараны. Видно, что гарантированная малая глубина реки между пунктами Пьи и Мандалай около 2.5 м. Последнее исследование изменения глубины реки Ирравади показало, что в ближайшее время глубина реки будет находиться на уровне меньше 2.5 м.

Для расчета скоростного режима и выбора осадки предполагается принять гарантированную глубину  $h \approx 2$  м. В табл.1 приведены относительные глубины воды при движении скоростных катамаранов различной длины по реке Ирравади со сверхкритической скоростью.

Таблица 1  
Относительные глубины воды

Глубина воды Ирравади h, м	Для судна длиной L=30 м Отношение h/L	Для судна длиной L=35 м Отношение h/L	Для судна длиной L=40 м Отношение h/L	Для судна длиной L=45 м Отношение h/L
1	0.03	0.03	0.03	0.02
1.2	0.04	0.03	0.03	0.03
1.4	0.05	0.04	0.04	0.03
1.6	0.05	0.05	0.04	0.04
1.8	0.06	0.05	0.05	0.04
2	0.07	0.06	0.05	0.04
2.2	0.07	0.06	0.06	0.05
2.4	0.08	0.07	0.06	0.05
2.6	0.09	0.07	0.07	0.06
2.8	0.09	0.08	0.07	0.06
3	0.10	0.09	0.08	0.07

Из рассмотрения табл.1 следует, что на реке Ирравади для скоростных катамаранов длиной от 30 до 45 м, отношения  $h/L$  изменяются с 0.02 до 0.1.

Согласно рис.8, если отношение  $h/L$  равно 0.02, то число Фруда по длине должно принимать значение около 0.26 . Если отношение  $h/L$  равно 0.1, то число Фруда по длине должно принимать значение большее, чем 0.43. Скоростные катамараны для перевозок пассажиров по реке Ирравади будут эксплуатироваться в зоне сверхкритических скоростей. Такие относительные скорости близки к так называемой предельной скорости движения для водоизмещающих надводных кораблей, указанной в работе [2]. В качестве примера в табл. 2 приведены скорости хода скоростного катамарана длиной 40м в сверхкритической зоне на различных глубинах реки Ирравади. При обеспечении постоянной скорости хода и на глубокой воде скоростные катамараны будут сохранять скорость движения на малых глубинах реки Ирравади.

Таблица 2  
Сверхкритические скорости на мелкой воде

Отношение h/L	Числа Фруда Fn	Скорость v, уз.
0.03	0.28	$\geq 10.61$
0.03	0.29	$\geq 11.15$
0.04	0.30	$\geq 11.67$
0.04	0.32	$\geq 12.16$
0.05	0.33	$\geq 12.63$
0.05	0.34	$\geq 13.08$
.06	0.35	$\geq 13.51$
0.06	0.36	$\geq 13.92$
0.07	0.37	$\geq 14.31$
0.07	0.38	$\geq 14.68$
0.08	0.39	$\geq 15.04$

### **Заключение**

Рассмотрены проблемы обеспечения проектирования скоростных катамаранов, предназначенных для эксплуатации по внутренним водным путям ограниченной глубины. Проанализирован исторический аспект использования катамаранов. Отмечено, что мореходные качества объектов такого типа интуитивно использовались во времена, когда теория корабля еще не была развита.

Мореходные качества скоростных катамаранов в условиях мелкой воды обеспечили их применение в наше время на внутренних водных путях. Отмечен опыт России в исследованиях, проектировании, постройке и эксплуатации судов такого типа. Рассмотрена целесообразность создания скоростных катамаранов для обеспечения пассажирских перевозок в Союзе Мьянма.

### **Литература**

1. Басин А.М., Анфимов В.Н. Гидродинамика судна. Сопротивление воды, движители, управляемость и качка.– Л.: Речной транспорт, 1961. 684 с.
2. Джилмер Т.С. Проектирование современного корабля. – Л.: Судостроение, 1974. 280 с.
3. Ляховицкий А.Г. и др. Проектирование скоростных катамаранов с подводными крыльями // Судостроение, № 2. 2005. С. 9–15.
4. Ляховицкий А.Г. Основы проектирования скоростных судов. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2009. 181 с.
5. Ляховицкий А.Г. Влияние гидродинамики на концептуальное проектирование многокорпусных судов. Доклады научно-технической конференции. Проблемы мореходных качеств судов, корабельной гидромеханики и освоения шельфа. XLV Крыловские чтения.– СПб. 2013. С. 46–48.
6. Ляховицкий А.Г., Зорин М.П. Анализ результатов ходовых испытаний катамарана со сверхкритической скоростью в условиях мелководья // Труды ЛИВТ. 1980. Вып. 168. С. 48–54.
7. Lyakhovitsky A.G. Shallow Water and Supercritical Ships. Fair Lawn, NJ, USA: Backbone Publishing Co., 2007. 277p.

### **References**

1. Basin A.M., Anfimow W.N. Gidrodinamika sudna. Soprotivlenie wodi, dwizhiteli, upravljajemost i kachka. – L.: Rechnoiy transport, 1961. 684 s.
2. Gilmer T.C. Proektirovanie sovremennoogo korabliy. – L.: Sudostroenie, 1974. 280 s.
3. Lyakhovitsky A.G. i dr. Proektirovanie skorostnich katamaranow s podvodnimi krilyami // Sudostroenie, 2005. N 2. S. 9–15.
4. Lyakhovitsky A.G. Osnovi proektirovaniya skorostnich sudov. – SPb.: Izd. Zentr SPbGMTU, 2009. 181 s.
5. Lyakhovitsky A.G. Vliyanie gidrodinamiki na konzeptualnoe proektirovanie mnogokorpusnich sudov // Dokladi nauchno-tehnicheskoy konferenzi. Problemi morechodnich kachestv sudov, korablnoy gidromechaniki i osvoeniyy shelve. XLV Krilovskie chteniya. –SPb. 2013. S. 46–48.
6. Lyakhovitsky A.G., Zorin M.P. Analiz rezul'tatov khodovikh ispitaniy katamarana so sverchkriticheskoy skorostiu v usloviyach melkovodiya // Trudi LIVT, 1980. Vip. 168. S. 48–54.
7. Lyakhovitsky A.G. Shallow Water and Supercritical Ships. Fair Lawn, NJ, USA: Backbone Publishing Co., 2007. 277p.

## **Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства**

УДК 681.326

### **К РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ С ПОВЫШЕННЫМИ УПРУГОДЕМПФИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ**

**Славгородская Александра Владимировна**, кандидат технических наук, доцент  
доцент кафедры Самолето-и вертолетостроения  
Дальневосточный Федеральный Университет (ДВФУ) Инженерная школа ДВФУ  
Владивосток, Россия  
E-mail: alexandri-s@yandex.ru

**Молоков Константин Александрович**, кандидат технических наук  
доцент кафедры Сварочного производства  
Дальневосточный Федеральный Университет (ДВФУ) Инженерная школа ДВФУ  
Владивосток, Россия  
E-mail: spektrum011277@gmail.com

**Погодаев Антон Васильевич**, ассистент кафедры Сварочного производства  
Дальневосточный Федеральный Университет (ДВФУ) Инженерная школа ДВФУ  
Владивосток, Россия  
E-mail: pogodaev-av@mail.ru

**Немкин Дмитрий Викторович**, аспирант кафедры кораблестроения и океанотехники  
Дальневосточный Федеральный Университет (ДВФУ) Инженерная школа ДВФУ  
Владивосток, Россия  
E-mail: dimasenchek@mail.ru

#### **АННОТАЦИЯ**

Эффективность эксплуатации судов во многом зависит от того, насколько эффективно работают их гребные винты. Обычные винты фиксированного шага проектируются на конкретный режим работы, на других режимах их эффективность снижается. Представляет интерес создание гребных винтов фиксированного шага с податливыми лопастями, геометрические характеристики которых изменяются при изменении нагрузки.

Апробирована методика моделирования и разработки технологии создания гребных винтов из набора перфорированных пластин с повышенными упругодемпфирующими свойствами. В соответствии с разрабатываемой методикой 3D моделирования сформированы трехмерные компьютерные модели гребных винтов с набором лопастей из листовой нержавеющей стали волнистой и (или) изогнутой поверхности лопастей гребных винтов, в целях повышения их упругих свойств.

Ожидаемые преимущества от внедрения предлагаемых типов гребных винтов – это возможность облегчения конструкции, сниженная кавитация, ремонтопригодность.

**Ключевые слова:** гребной винт, кавитация, перфорированная лопасть, статическое растяжение, прочность, акустическая эмиссия, термографическое изображение.

### **ABOUT THE DEVELOPMENT OF A DESIGN AND MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR SCREW PROPELLER WITH INCREASED ELASTIC-DAMPING PROPERTIES**

**Slavgorodskaya Alexandra Vladimirovna**, Ph.D. Degree in Technical Sciences,  
Associate professor in Branch of FEFU (Arsenyev),  
Engineer school, aircraft & helicopter building department  
Far Eastern Federal University, School of Engineering, Vladivostok, Russia  
E-mail: alexandri-s@yandex.ru

**Molokov Konstantin Aleksandrovich**, Ph.D. Degree in Technical Sciences,  
Associate professor  
Far Eastern Federal University, School of Engineering  
Vladivostok, Russia  
E-mail: spektrum011277@gmail.com

**Pogodaev Anton Vasilevich**, assistant professor  
Far Eastern Federal University, School of Engineering  
Vladivostok, Russia  
E-mail: pogodaev-av@mail.ru

**Nemkin Dmitrij Viktorovich**, graduate student  
Far Eastern Federal University, School of Engineering  
Vladivostok, Russia  
E-mail: dimasenchek@mail.ru

## ABSTRACT

The efficiency of the operation of vessels is largely dependent on how effectively their propellers operate. Conventional fixed pitch propellers are designed for a specific operating mode; in other modes their effectiveness is reduced. Construction of fixed pitch propellers with non-rigid blades, the geometric characteristics of which change, when the load changes, is of interest.

The method for modeling and development of the technology to construct propellers made of a set of perforated plates with elevated elastic and damping properties was proven. In accordance with the developed 3D simulation methodology the three-dimensional computer models were generated for propellers with a set of blades made of sheet stainless steel with the wavy and (or) curved surface of the propeller blades in order to increase their yielding properties.

The expected benefits from the implementation of the proposed types of propellers are an ability to get a lighter construction, reduced cavitation, and maintainability.

**Key words:** screw propeller, cavitation, perforated blade, static stretching, strength, acoustic emission, thermal image.

С увеличением скорости движения технология проектирования морского транспорта особенно судов с динамическими принципами поддержания по многим параметрам повторяет историю самолето- и вертолетостроения, так длина крыла увеличивалась пропорционально скорости летательных аппаратов. Логично ожидать увеличение рабочей поверхности морских двигателей, в том числе и длины лопастей гребных винтов.

Известно, что с увеличением длины конструктивного элемента увеличиваются его упругие деформации, которые могут быть дополнительным преимуществом по аккумуляции энергии в сравнении с традиционными гребными винтами по аналогии с объектами живой природы (плавники кита малейшими движениями создают значительные перемещения). То же можно сказать и о профилировании лопасти волнистой поверхностью, позволяющей удерживать пограничный слой воды и тем самым создавая дополнительную несущую поверхность существенно повысить коэффициент полезного действия [1,2,3,4].

При существующей технологии изготовления гребных винтов литьем под давлением и дальнейшей доводкой на станках ЧПУ обеспечить повышенные упругие свойства в заданном направлении для лопастей возможно только за счет видоизменения их геометрической формы. В по-

следнее время вид гребных винтов значительно изменился и по количеству лопастей и внешнему очертанию и качеству изготовления и все больше похожи на дизайнерские разработки достойные музея современного искусства.

В соответствии с разрабатываемой методикой 3D моделирования волнистой и (или) изогнутой поверхности лопастей гребных винтов в целях повышения их упругих свойств сформированы трехмерные компьютерные модели гребных винтов с набором лопастей из листовой нержавеющей стали (рис. 1,а). Так как при работе гребного винта имеется сильное гидродинамическое сопротивление вблизи комля, создаваемое утолщением лопасти, рационально уменьшить ширину за счет увеличения толщины накладными профилированными листами. Можно создать начальную кривизну лопастей обратную ожидаемой деформации по аналогии с кривизной рессор. Предложенная расчетная модель гребного винта с перфорацией лопастей (рис. 1,б).

Лазерные технологии на тонкой лопасти или гидроабразивной резки с увеличением толщины позволяют вырезать отверстия сложной геометрической формы без остаточных деформаций, без рваных краев и других дефектов кромки – точность резки составляет 0,1 мм.

Разрабатываемая методика проектирования гребного винта из набора фигурных пластин основана на принципе «брюса равного сопротивления», обеспечивающего помимо условия равнопрочности повышение упругих свойств по сравнению с традиционной цельной лопастью аналогично рессоре автомобиля.

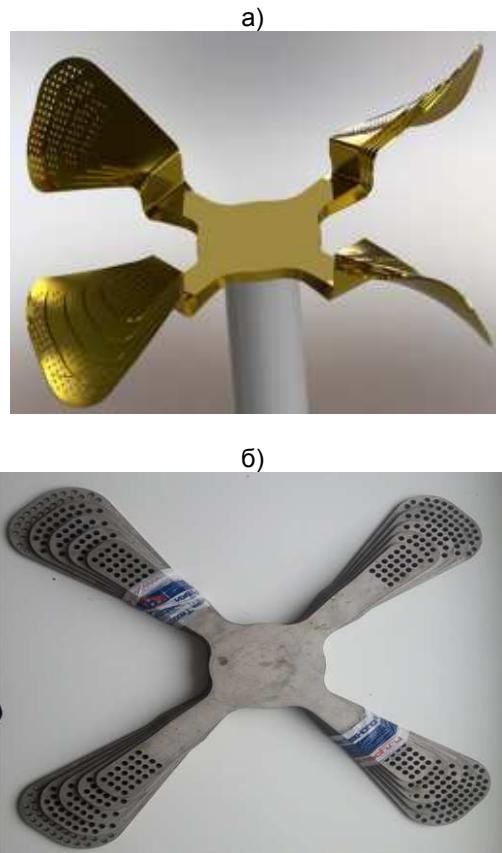


Рис. 1. Модели гребного винта с повышенными упругодемпфирующими свойствами

Из опыта растяжения плоских тонких образцов (рис. 2) с круглыми отверстиями прослеживается следующая закономерность: с увеличением количества отверстий при одинаковой площади ослабленного поперечного сечения предел прочности (напряжение соответствующее максимальной растягивающей силе) практически не изменяется, однако площадь диаграммы растяжения (в координатных осях сила-удлинение) уменьшается за счет уменьшения пластической деформации (рис. 3); при пересчете максимальной разрушающей нагрузки с образцов без отверстий 1,2,3,4 на образцы с отверстиями 5,6, максимальная разрушающая нагрузка увеличивается примерно на 30%, что обосновывается многоосным напряженным состоянием [5]. Данные всех испытаний образцов приведены в таблице 1.



Рис. 2. Виды образцов для испытаний на статическое растяжение:

1,2,3,4 – сталь 3, без отверстий; 5,6 – сталь 3, отверстия малого диаметра; 7 – нержавейка 12Х18Н10Т, отверстия малого диаметра; 8,9 – алюминий АМГ5, отверстия малого диаметра; 10,11 – сталь 3, отверстия большого диаметра; 12,13 – сталь 3, комплекс отверстий большого диаметра

Характеристики образцов и параметры нагружения материалов при статическом растяжении

Вид образца	Толщина, мм	Ширина, мм	Длина, мм	Предел текучести, Н/мм <sup>2</sup>	Максимальная нагрузка, кН	Максимальное напряжение, Н/мм <sup>2</sup>	Нагрузка разрушения, кН	Сталь
1	2,0	55,0	250	266,3	31,08	282,5	4,22	Сталь 3
2	2,0	55,0	250	283,7	33,18	301,6	9,59	
3	2,0	55,0	250	305,4	33,75	306,9	6,97	
4	2,0	55,0	250	292,5	33,74	306,7	7,14	
5	2,0	55,0	250	–.–	23,11	210,1	15,81	
6	2,0	55,0	250	–.–	22,11	209,1	14,93	
7	2,0	55,0	250	–.–	42,85	389,6	27,89	12Х18Н10Т
8	2,0	55,0	250	129,5	16,94	154,0	11,64	АМГ 5
9	2,0	55,0	250	127,5	16,63	151,1	16,21	
10	2,0	55,0	250	172,4	20,79	189,0	9,90	
11	2,0	55,0	250	172,7	20,70	188,2	2,48	Сталь 3
12	2,0	55,0	250	174,1	20,58	187,1	14,69	
13	2,0	55,0	250	173,7	21,07	191,5	11,82	

Чем больше отверстий тем более закономерно хрупкое разрушение при более высоком опасном напряжении – эффект временного упрочнения материала (явление иногда называется «наклеп» как следствие предварительного пластического деформирования). Существует способ снижения опасных напряжений вблизи трещин за счет рассверливания конца трещины круглым отверстием в таком случае изменяются напряжения вблизи конца трещины, т.е. круглые отверстия исключают возможные касательные сдвиговые перемещения за счет увеличения поверхности (площади) и тем самым снижения опасных напряжений.

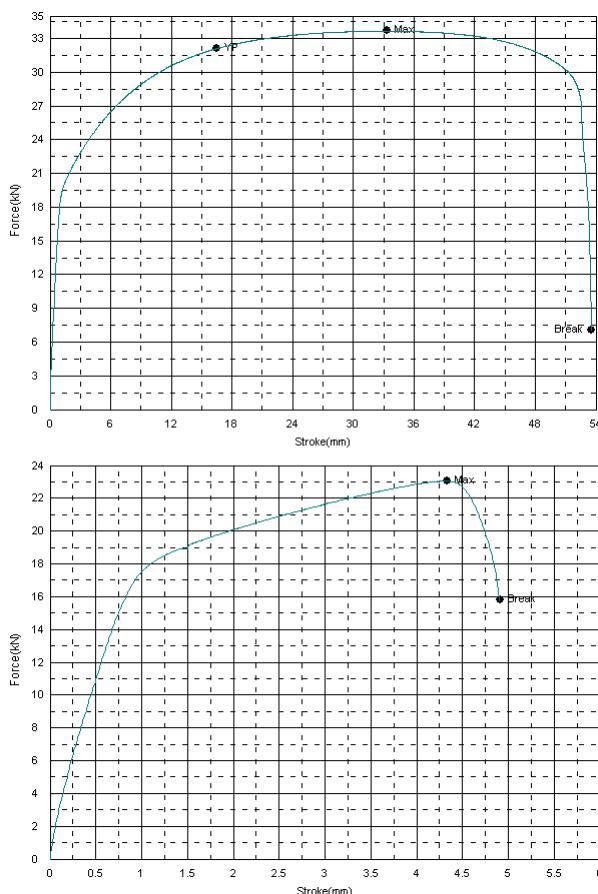


Рис. 3. Диаграммы растяжения плоских образцов из стали 3: снизу для образа 5, сверху для 4

Одной из причин кавитации лопастей гребных винтов является нагрев поверхности значительно понижающий предел текучести (напряжение соответствующее началу заметных пластическим деформаций и сопровождающихся разогревом материала). Заранее ослабленной поверхности круглыми отверстиями необходима тепловая энергия для развития безопасной упругой деформации. Температурный подогрев иногда используется для снятия остаточных напряжений (пластических) в материале и регуляции кристаллической структуры материала. Температурные перемещения не всегда создают температурные напряжения – при отсут-

ствии препятствия росту температурных перемещений температурные напряжения не возникают. Круглые отверстия являются концентраторами напряжений менее опасными чем трещины, но при деформации увеличивается площадь концентратора, и часть напряжений снижается и перераспределяется по направлению вырезов. Приток тепла извне исключает развитие пластических деформаций и тратится на температурные перемещения, что способствует безопасным упругим деформациям [13].

Перераспределение опасных напряжений в перфорированной пластине при упругой деформации демонстрируется изменением температурного поля, которое можно характеризовать как эффект охлаждения.

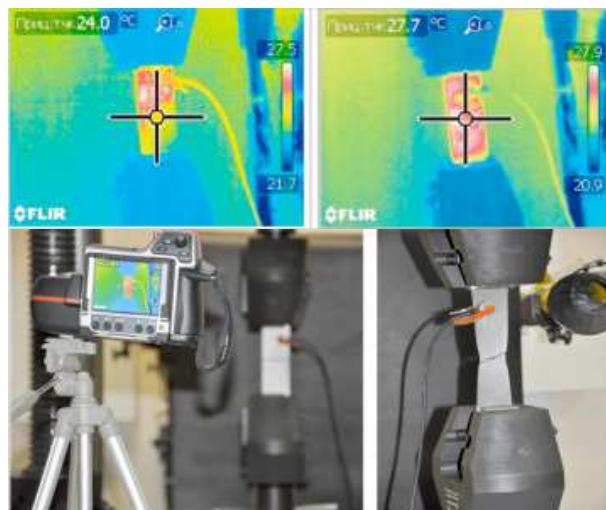


Рис. 4. Термографические изображения перфорированной и цельной пластины в момент разрушения

Если действительно повышение температуры объясняется наличием внутреннего трения, то, исключив его возможность переносом критических напряжений в менее опасную зону, например вблизи круглого выреза, можно не только увеличить прочность конструкции перфорацией, но и добиться снижения температуры материала за счет его расширения, что, как правило, характерно для вязкой среды.

Предположение, что снижение даже на 1÷2 градуса может отодвинуть температуру кавитации в гребных винтах, требует проверки, но может использоваться в терморегуляторах, когда для более быстрого охлаждения можно создать упругую встряску.

Прочность перфорированных конструкций обсуждалась еще на заре самолетостроения, однако до сих пор положительный эффект снижения температурных напряжений используется не так активно.

Для сравнительной оценки усталостной прочности использовался тепловизор итальянского производства FLIR и виброметрический прибор (ВИП) «ПОИСК – 2М». Прибор обеспечивает измерение амплитуды ускорения меха-

нических колебаний, действующих на ВИП, от 1 до  $10 \text{ м/c}^2$  в диапазоне частот от 10 до 600 кГц (рис. 5).



Рис. 5. Преобразователь виброизмерительный «ПОИСК – 2М»

Принцип работы прибора основан на преобразовании сигнала акустической эмиссии в электрический сигнал и дальнейшей его обработке с выводом результатов на цифровое табло и возможность анализа информации на персональной ПЭВМ: амплитудного значения входного сигнала в микровольтах, сохранение этих данных в файле и вывод их на экран компьютера (рис. 6).

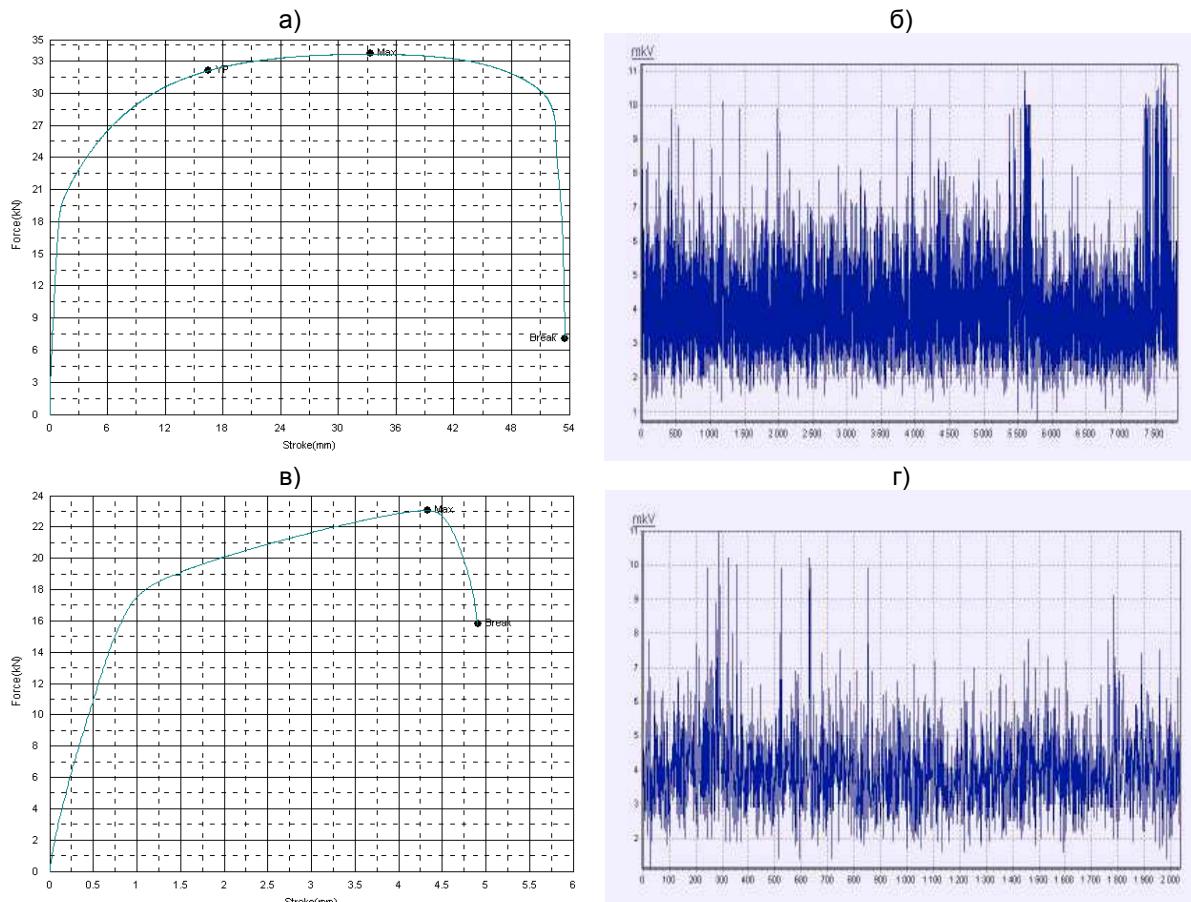


Рис. 6. Сравнительный анализ результатов статического растяжения (а, в) и соответствующих диаграмм акустической эмиссии (б, г) плоских образцов: образец 4 – а, б; образец 5 – в, г

Плотность диаграммы акустической эмиссии в материале с вырезами ниже чем в цельных пластинах, что свидетельствует о большей выносливости образцов с искусственно созданными дефектами круглой формы, частично исключающими развитие зон накопления пластических разрушений. Интересна диаграмма растяжения для нержавеющей стали (образец 7), более высокие прочностные показатели объясняются упрочненным состоянием проката, но акустические всплески указывают на склонность к внезапному хрупкому разрушению, рис. 7, 8 следовательно, регулирование геометрии вырезами в

соответствующих направлениях развития повреждений становится необходимостью.

Перфорация лопасти кроме снижения температуры поверхности за счет упругой деформации должна обладать другими положительными свойствами: меньшее гидродинамическое сопротивление за счет так называемых искусственных каверн, создающих эффект удержания пограничного слоя и демпфирования колебаний [10].

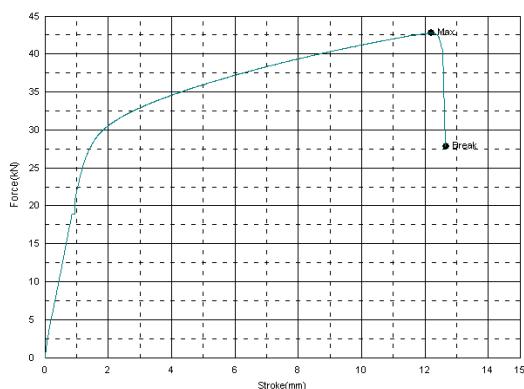


Рис. 7. Диаграмма растяжения для образца 7 из нержавеющей стали

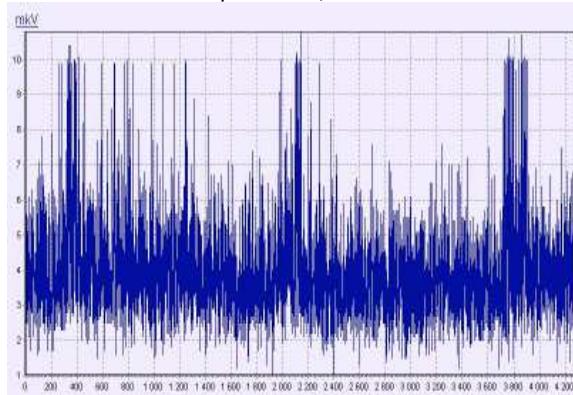


Рис. 8. Диаграмма акустической эмиссии для образца 7 из нержавеющей стали

Для наборного из пластин упруго деформируемого винта задача определения деформаций и способ ее решения значительно упрощается так как тонкая симметричная лопасть не работает на кручение и осевая линия это ось изгиба.

Ожидаемые преимущества от внедрения предлагаемых типов гребных винтов – это возможность облегчения конструкции, сниженная кавитация.

Основным препятствием при реализации проекта является ограниченность выбора марок нержавеющего проката. Необходимо разработать материал обладающий как коррозионной стойкостью так и повышенной выносливостью [1].

Стоимость таких винтов предположительно меньше в десятки раз, долговечность и ремонтопригодность естественно повышается за счет сменных форм. Уникальность и фирменный стиль гребного винта для соответствующего класса лодки и внешняя эргономичность должны способствовать коммерциализации продукта.

Предлагаемая технология проектирования и изготовления лопастей гребных винтов заявлена впервые, экономически целесообразна, так как отвечает современным требованиям качества, веса и стоимости изготовления.

*Работа выполнена в рамках госзадания Министерства образования и науки России, проект 543.*

## Литература

1. Аносов А.П., Славгородская А.В. Вопросы циклической прочности судовых конструкций.– Владивосток: Дальрыбвтуз, 2003. 160 с.
2. Басков Б., Саитов В. Изготовление моделей гребных винтов с использованием технологий Delcam plc. САПР и графика №9, 2013. Электронный ресурс, режим доступа: <http://www.sapru.ru/Article.aspx?id=7121>
3. Госсорт Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. – М.: МИР, 1988. 416с.
4. Копчук О.В. Винты нового поколения для быстроходных судов и кораблей. Электронный ресурс, режим доступа: <http://www.supercomputers.ru>
5. Матохин Г.В. Оценка ресурса сварных конструкций из феррито-перлитных сталей. – Владивосток: ДВГТУ, 2001. 202 с.
6. Прохоренко В.П. SolidWorks. Практическое руководство. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2004. 448 с.
7. Руководство по эксплуатации ВИДГ. 412.239. 003 РЭ «ПОИСК-2М» прибор измерительный.
8. Тику Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2004. – СПб.: Питер, 2005. 768 с.
9. Славгородская А.В., Молоков К.А., Богаевский А.И., Славгородский В.М. Методика прогнозирования устойчивости поврежденной конструкции по данным термодиагностики. Электронное периодическое издание «Вестник Инженерной Школы ДВФУ». Вып. № 1(10) 2011. С. 35–39.
10. Славгородская А.В., Китаев М.В. Конструкция гребного винта с волнистыми лопастями: Сборник трудов всероссийской научно-технической конференции «Вологдинские чтения».– Владивосток: ДВФУ, 2011.
- 11 ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ RU №109090 U1. Гребной винт. Славгородская А.В., Китаев М.В., Герман А.П., Журенко А.А. [заявка№2011118400/11, 04.05.2011] B63H1/00 опубл.: 10.10.2011, Бюл. № 28.
12. ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ RU №109091 U1. Гребной винт . Славгородская А.В., Китаев М.В., Герман А.П., Журенко А.А. [заявка№2011118401/11, 04.05.2011] B63H1/001 опубл.: 10.10.2011, Бюл. № 28.
13. ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ RU №109089 U1. Гребной винт. Славгородская А.В., Китаев М.В., Герман А.П., Журенко А.А. [заявка№2011118097/11, 04.05.2011] B63H1/00 опубл.: 10.10.2011, Бюл. № 28.

14. ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ RU №112885 U1. Гребной винт. Славгородская А.В., Китаев М.В., Герман А.П., Журенко А.А. [заявка №2011118402/11, 06.05.2011] B63H1/00 опубл.: 27.01.2012, Бюл. № 3.

15. ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ RU №109092 U1. Гребной винт. Славгородская А.В., Власов И.Б., Славгородский В.М. [заявка №2011107923/11, 01.03.2011] B63H3/00 опубл.: 10.10.2011, Бюл. № 28.

16. ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ RU №126315. Гребной винт. Славгородская А.В., Богаевский А.И., Погодаев А.В., Молоков К.А. [Заявка №2012138248 от 06.09.2012] опубл.: 27.03.2013, Бюл. № 3.

17. ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ RU №129079. Гребной винт. Славгородская А.В., Богаевский А.И., Погодаев А.В., Молоков К.А. [Заявка №2012138247 от 06.09.2012] опубл.: 20.06.2013, Бюл. № 17.

18. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.

### References

1. Anosov A.P., Slavgorodskaja A.V. Voprosy ciklicheskoj prochnosti sudovyh konstrukcij. Vladivostok: Dal'rybvtuz, 2003. 160 s.
2. Baskov B., Saitov V. Izgotovlenie modelej grebnyh vintov s ispol'zovaniem tehnologij Delcam plc. SAPR i grafika №9, 2013. Jelektronnyj resurs, rezhim dostupa: <http://www.sapru.ru/Article.aspx?id=7121>
3. Gossorg Zh. Infrakrasnaja termografija. Osnovy, tekhnika, primenenie. M.: MIR, 1988. 416 s.
4. Kopchuk O.V. Vinty novogo pokolenija dlja bystrohodnyh sudov i korablej. Jelektronnyj resurs, rezhim dostupa: <http://www.supercomputers.ru>
5. Matohin G.V. Ocenna resursa svarynh konstrukcij iz ferrito-perlitnyh stalej. Vladivostok: DVG TU, 2001. 202 s.
6. Prohorenko V.P. SolidWorks. Prakticheskoe rukovodstvo. M.: OOO «Binom-Press», 2004g. 448 s.
7. Rukovodstvo po jeksploatacii VIDG. 412.239. 003 Rje «POISK-2M» pribor izmeritel'nyj.
8. Tiku Sh. Jeffektivnaja rabota: SolidWorks 2004. SPb.: Piter, 2005g. 768 s.
9. Slavgorodskaja A.V., Molokov K.A., Bogaevskij A.I., Slavgorodskij V.M. Metodika prognozirovaniya ustojchivosti povrezhdennoj konstrukcii po dannym termodiagnostiki. Jelektronnoe periodicheskoe izdanie «Vestnik Inzhenernoj Shkoly DVFU», Vypusk № 1(10) 2011. S. 35–39.
10. Slavgorodskaja A.V., Kitaev M.V. Konstrukcija grebnogo vinta s volnistymi lopastjami Sbornik trudov vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Vologdinskie chtenija», Vladivostok: DVFU, 2011.
11. PATENT NA POLEZNUJU MODEL" RU №109090 U1. Grebnoj vint. Slavgorodskaja A.V., Kitaev M.V., German A.P., Zhurenko A.A. [zajavka№2011118400/11, 04.05.2011] B63H1/00 opubl.: 10.10.2011, Bjul. № 28
12. PATENT NA POLEZNUJU MODEL" RU №109091 U1. Grebnoj vint. Slavgorodskaja A.V., Kitaev M.V., German A.P., Zhurenko A.A. [zajavka№2011118401/11, 04.05.2011] B63H1/001 opubl.: 10.10.2011, Bjul. № 28.
13. PATENT NA POLEZNUJU MODEL" RU №109089 U1. Grebnoj vint. Slavgorodskaja A.V., Kitaev M.V., German A.P., Zhurenko A.A. [zajavka№2011118097/11, 04.05.2011] B63H1/00 opubl.: 10.10.2011, Bjul. № 28.
14. PATENT NA POLEZNUJU MODEL" RU №112885 U1. Grebnoj vint. Slavgorodskaja A.V., Kitaev M.V., German A.P., Zhurenko A.A. [zajavka №2011118402/11, 06.05.2011] B63H1/00 opubl.: 27.01.2012, Bjul. № 3.
15. PATENT NA POLEZNUJU MODEL" RU №109092 U1. Grebnoj vint. Slavgorodskaja A.V., Vlasov I.B., Slavgorodskij V.M. [zajavka №2011107923/11, 01.03.2011] B63H3/00 opubl.: 10.10.2011, Bjul. № 28.
16. PATENT NA POLEZNUJU MODEL" RU №126315. Grebnoj vint. Slavgorodskaja A.V., Bogaevskij A.I., Pogodaev A.V., Molokov K.A. [Zajavka №2012138248 от 06.09.2012] opubl.: 27.03.2013, Bjul. № 3.
17. PATENT NA POLEZNUJU MODEL" RU №129079. Grebnoj vint. Slavgorodskaja A.V., Bogaevskij A.I., Pogodaev A.V., Molokov K.A. [Zajavka №2012138247 от 06.09.2012] opubl.: 20.06.2013, Bjul. № 17.
18. GOST 1497-84. Metally. Metody ispytanij na rastjazhenie.

## Эксплуатация судов

УДК 629.5.015.5

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕСУРСА КОРПУСОВ СУДОВ

**Казанов Геннадий Тимофеевич**, кандидат технических наук, доцент  
 доцент кафедры общетехнических дисциплин  
 ТОВМИ им. С.О. Макарова. Владивосток. Россия  
 E-mail: kazgentim1@mail.ru

**Новиков Валерий Васильевич**, кандидат технических наук  
 доцент кафедры кораблестроения и океанотехники  
 Дальневосточный Федеральный Университет (ДВФУ) Инженерная школа ДВФУ  
 Владивосток, Россия  
 E-mail: leka1551@rambler.ru

#### АННОТАЦИЯ

Техническое состояние корпуса судна является одним из важнейших факторов обеспечения безопасности мореплавания и эффективности эксплуатации судна. Для осуществления текущего контроля за состоянием корпуса судна в ходе его эксплуатации необходимы методики, позволяющие осуществлять указанный контроль оперативно и с минимальными затратами. Различными авторами разработаны консультативные диаграммы, позволяющие экипажу судна в море оценивать те или иные реакции судна (например, бортовую качку, изгибающий момент в среднем сечении) в зависимости от условий плавания (интенсивность волнения, скорость хода и курсовой угол по отношению к волнению) и нагрузки судна (возвышение центра тяжести, изгибающий момент на тихой воде). Это дает принципиальную возможность повысить безопасность плавания судна еще до его выхода в рейс.

В данной работе предлагается оптимизировать реакции судна на волнении путем рационального изменения весовой нагрузки. Полученные формулы позволяют осуществлять оптимизацию весовой нагрузки за счет обоснования ее более благоприятного с точки зрения общей продольной прочности на волнении несимметричного распределения по длине.

**Ключевые слова:** весовая нагрузка, эксплуатационный ресурс, конструкции корпуса, общая продольная прочность судна.

### SUPPORT OF THE SERVICE LIFE OF THE SHIP'S HULL

**Kazanov Gennady Timofeevich, PhD.**  
 The Associate Professor of Pacific Naval Institute  
 Vladivostok, Russia  
 E-mail: kazgentim1@mail.ru

**Novikov Valeriy Vasilevich, PhD.,**  
 The Associate Professor of Shipbuilding and Ocean Engineering  
 Far Eastern Federal University, School of Engineering  
 Vladivostok, Russia  
 E-mail: leka1551@rambler.ru

#### ABSTRACT

The technical condition of the ship hull is one of the most important factors to ensure navigation safety and efficiency of ship operation. For monitoring the hull condition during its operation the techniques are required which allow implementing the specified monitoring quickly and with minimum costs. Various authors have developed advisory charts allowing the crew of the ship to evaluate the various ship reactions at sea (e. g., rolling, bending moment in the middle section) depending on the sailing conditions (the intensity of waves, rate of sailing and heading angle relative to waves) and ship load (the elevation of the center of gravity, the bending moment in still water). This gives the principal opportunity to improve the safety of ship navigation before it was set out on a voyage.

This paper proposes to optimize the reactions of the ship on waves through rational change of the weight load. The obtained equations allow optimizing the weight load due to provision of grounds for its

asymmetric distribution along the length which is more favorable from the point of view of the overall longitudinal strength with waves.

**Key words:** weight capacity, service life, hull design, overall longitudinal strength of the ship.

Обеспечение надежной эксплуатации судна в целом, его корпуса и отдельных корпусных конструкций – одна из важнейших проблем, которая до сих пор, главным образом, решается в процессе проектирования. Анализ условий, сопровождающих катастрофические повреждения судовых конструкций, показывает, что в последние 25 лет участились случаи серьезных повреждений корпусов судов, связанные с нарушением местной и общей прочности и приводящие к гибели судна и экипажа [1,2,6].

Статистические данные причин аварий и гибели судов показывают, что их высокий уровень в первую очередь объясняется умением судоводителей принимать правильные решения по управлению судном, определенного архитектурно-конструктивного типа и варианта загрузки, в сложной по погодным условиям навигационной обстановке.

Прямой учет характеристик движения судна, состояния взволнованной поверхности моря при разработке различного рода пособий для управления судном в шторм приводит к практически мало удобным формам из-за громоздкости и сложности [3].

Более реалистичным является подход, основанный на допущениях, позволяющих существенно упростить построение и использование консультативных пособий при обеспечении точности выходных рекомендаций, отвечающих точности исходной информации [3]. Принятые допущения позволяют построить серию диаграмм изменения реакций корпуса в зависимости от скорости и курсового угла при различных волновых режимах (рис. 1, 2).

Они получили название консультативных, строятся в относительных координатах и могут использоваться для широкого диапазона значений длины судов, что позволяет в дальнейшем исключить принимаемые «на морской глаз» решения в сложных навигационных условиях и все более объективно следовать понятиям «хорошая морская практика», оптимальный режим движения.

Под оптимальным понимается такой режим, который в данных условиях волнения позволяет двигаться с максимальной скоростью и минимальным отклонением от расчетного курса при соблюдении требований к прочности корпуса и других условий безопасности.

В окне представлены пять диаграмм, четыре из которых построены однотипно и служат для контроля в изменениях каждой основной реакции корпуса судна. Пятая диаграмма дает общее представление о всех реакциях, действующих в корпусе судна, в сопоставлении с их исходными значениями.

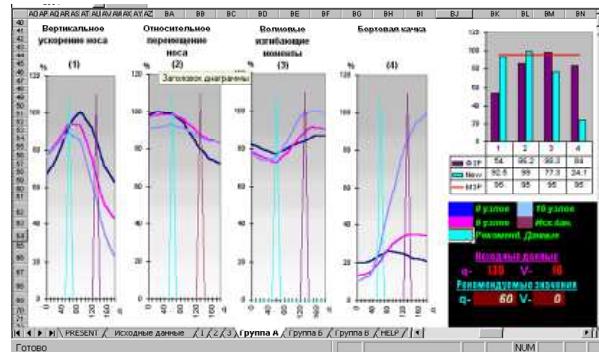


Рис. 1. Окно комплекта консультативных диаграмм

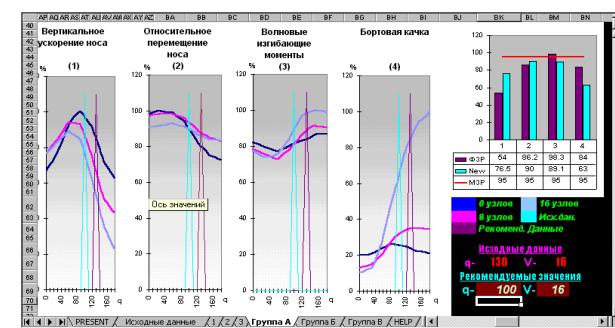


Рис. 2. Изменение основных реакций корпуса судна при уменьшении курсового угла  $q$  на 30°

Такое сочетание диаграмм позволяет осуществлять управление судном в шторм с наиболее полным представлением влияния характеристик движения судна на его основные реакции. Темный указатель свидетельствует о том, что судоводитель может уменьшить курсовой угол для уменьшения нагрузки на корпус судна и проявления бортовой качки. По пятой диаграмме в верхнем правом углу видно, что все светлые столбцы, соответствующие новым реакциям не выходят за уровень опасных (заданных) значений, которым соответствует верхняя горизонтальная линия (рис. 2).

Дальнейшими действиями судоводителя может быть уменьшение скорости, это вызовет перераспределение реакций.

Информационную поддержку действий судоводителей в шторм рекомендуется дополнять соответствующими наставлениями. Наставления готовятся организациями, ответственными за эксплуатацию судна в начальный, после постройки, и последующие периоды.

С целью более полного, многовариантного и удобного учета распределения масс в корпусе судна в расчетах по определению проектных и эксплуатационных характеристик судов выполнены теоретические исследования закономерностей изменения характеристик распределения масс судна в зависимости от особенностей его загрузки. Подобную идею уменьшения изгибаю-

щих моментов предложил в 1966 году еще будучи студентом проф. Антоненко С.В. в дипломной работе.

Полученные формулы [3,5] позволяют рассмотреть продольные радиусы инерции масс, моменты инерции судна для различных случаев приема, удаления и перемещения грузов и обосновать изменения в весовой нагрузке, уменьшающие действие волнового изгибающего момента.

Для удобства анализа и практических расчетов при определении нагрузок низкой и высокой частоты распределение масс судна  $m_i$  рассматривается, как правило, без учета присоединенных масс воды посредством соответствующих относительных продольных радиусов инерции масс. Они могут определяться в зависимости от целей расчетов относительно миделя для всего судна ( $\bar{\rho}_0$ ), для его носовой ( $\bar{\rho}_n$ ) и кормовой ( $\bar{\rho}_k$ ) частей по следующим выражениям:

$$\bar{\rho}_0 = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N P_i x_i^2}{\sum_{i=0}^N P_i}}; \quad \bar{\rho}_n = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N/2} P_i x_i^2}{\sum_{i=0}^{N/2} P_i}}; \quad \bar{\rho}_k = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{\sum_{i=N/2}^N P_i x_i^2}{\sum_{i=N/2}^N P_i}}, \quad (1)$$

где  $P_i$  – весовая нагрузка на теоретическую шпацию для данного состояния загрузки,  $x_i$  – расстояния или плечи соответствующей нагрузки на теоретическую шпацию.

В формулах (1) величина  $\sum P_i$  – весовое водоизмещение, для которого в дальнейшем используется распространенное обозначение –  $D$ , а  $\sum P_i x_i^2$  – моменты инерции, соответствующие относительным продольным радиусам инерции, далее рассматриваемые с обозначением  $I$ .

Тогда формулы (1) примут вид

$$\bar{\rho}_0 = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{I_0}{D_0}}; \quad \bar{\rho}_n = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{I_n}{D_n}}; \quad \bar{\rho}_k = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{I_k}{D_k}}. \quad (2)$$

В указанные формулы подставляются весовые показатели  $P_i$ , что соответствует практике подобных расчетов и позволяет получить интересующие характеристики.

Формулам (2), как и другим им, подобным, соответствует общее выражение

$$\bar{\rho} = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{I}{D}}. \quad (3)$$

Для вполне определенного архитектурно-конструктивного типа корабля, судна имеем  $L = \text{const}$ . Раскладывая выражение (3) по переменным  $I$ ,  $D$  в ряд Тейлора, и, сохранив члены ряда, соответствующие первым частным производным, получаем уравнение в дифференциальной форме

$$\bar{\rho} = \bar{\rho}_0 \left( 1 - \frac{\Delta D}{2D_0} \right) + \frac{\Delta I}{2L\sqrt{I_0 D_0}} \quad (4)$$

где  $\Delta D = \sum_{i=1}^n P_i$ ;  $\Delta I = \sum P_i x_i^2$  – изменение соответственно весового водоизмещения, момента инерции судна за счет переноса, приема или удаления составляющих водоизмещения  $P_i$ ;

$I_0$ ,  $D_0$ ,  $\bar{\rho}_0$  – исходные значения момента инерции, весового водоизмещения относительного радиуса инерции судна, возможные соотношения между которыми рассматриваются ниже.

Волновой изгибающий момент зависит от соотношения относительных продольных радиусов инерции масс носовой и кормовой частей судна  $\Delta \rho$  [3,4]. Эти соотношения с учетом знака получены в виде следующих выражений:

$$M_B = M_0 \left[ 1 - \left( \frac{\delta LT}{100 k_B r_B g} \Psi \pm \varepsilon \right) \Delta \rho \right], \quad (5)$$

где  $M_0$  – волновой изгибающий момент до перераспределения нагрузки;

$\delta LT$  – коэффициент общей полноты и главные размерения судна;

$k_B r_B g$  – волновой коэффициент, в общем случае зависящий от формы обводов, изгибающего момента на тихой воде, скорости судна, продольного радиуса инерции масс и положения судна на волне; полувысота волны, определяемая заданной обеспеченностью волнового момента и длиной судна; ускорение свободного падения

$\Psi$  – угловое ускорение при кильевой качке;

$\varepsilon = \pm 0,1$  – отклонение от среднего значения;

$\Delta \rho$  – определяется по формулам (6-7).

При вариантах загрузки судна, когда  $I_{h0} \cong I_{k0}$ ,  $D_{h0} \cong D_{k0}$ ,  $x_g$  стремится к нулю, а  $\bar{\rho}_{h0} - \bar{\rho}_{k0} \cong 0$

$$\Delta \rho = \frac{1}{\bar{\rho}_0} \left[ \frac{P_2(0,5l_2)^2 - P_1(0,5l_1)^2}{L \sqrt{I_{h(k)} D_{h(k)}}} \right]. \quad (6)$$

Принималось во внимание, что  $P_1 = 0,03D_0$ ;  $P_2 = 0,015D_0$ , поэтому  $P_2 - P_1 = -0,015D_0$ ;  $P_1 - P_2 = 0,015D_0$ .

С другой стороны, варианты загрузки судна, близкие к симметричным относительно миделя, характеризуются тем, что  $I_{h0} \cong I_{k0} \cong 0,5I_0$ , а  $D_{h0} \cong D_{k0} \cong 0,5D_0$ .

Тогда формула (4.6) принимает еще более простой вид

$$\Delta\rho = \frac{1}{\bar{\rho}_0} \left[ \frac{P_2 l_2^2 - P_1 l_1^2}{2L\sqrt{I_0 D_0}} \right], \quad (7)$$

где  $\bar{\rho}_0$  определяется по формуле (3), остальные величины ниже поясняются рис.3, а также на рис.4.4-4.6 монографии [6].

При эксплуатации корпус судна испытывает циклическое действие волновых нагрузок. Изменения в структурной повреждённости корпусной стали обусловлены проявлением усталости материала. Обеспечение безопасной эксплуатации корпусов судов должно определяться допустимым уровнем структурной повреждённости корпусной стали.

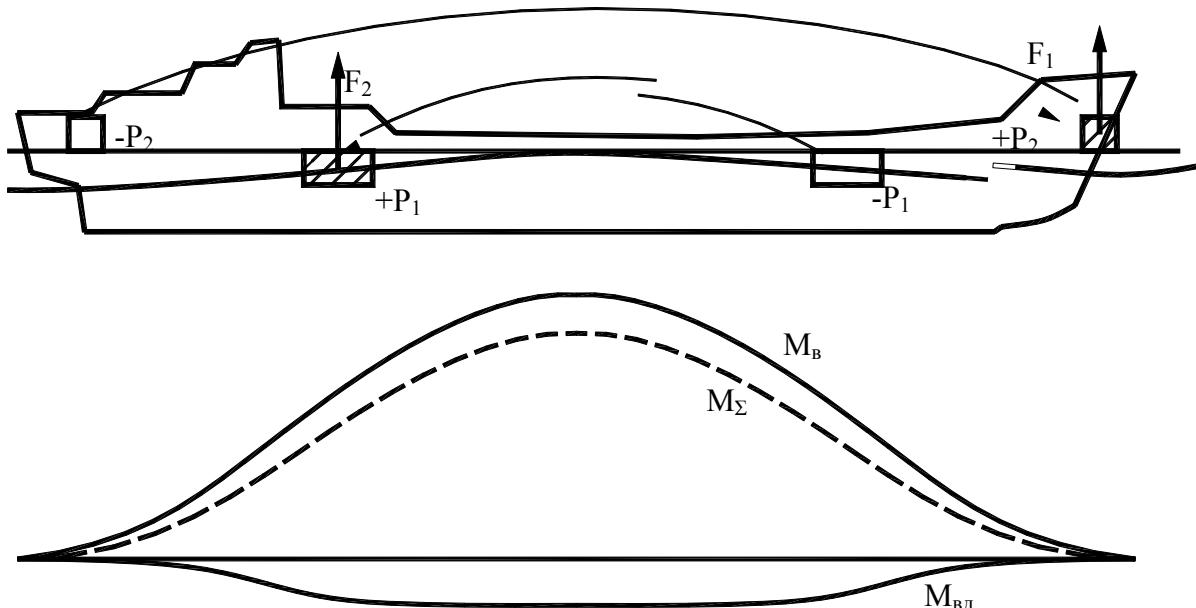


Рис. 3. Действие на вершине волны сил инерции от перераспределения весовой нагрузки встречным переносом

Для этого требуются соответствующие технический контроль и диагностика. В настоящее время они не только далеки от совершенства, но, практически, полностью отсутствуют [3,5.6].

Техническое состояние корпуса судна является одним из важнейших факторов обеспечения безопасности мореплавания и эффективности эксплуатации судна. Для осуществления текущего контроля технического состояния корпуса судна в ходе его эксплуатации необходимы методики, позволяющие осуществлять указанный контроль оперативно и с минимальными затратами.

Расчетный анализ, проведенный с использованием полученных формул позволил заключить следующее.

### Заключение

1. Полученные формулы позволяют осуществлять оптимизацию весовой нагрузки за счет обоснования ее более благоприятного с точки зрения общей продольной прочности на волнении несимметричного распределения по длине. Размещаемый груз создает силы инерции при кильевой качке, снижающие волновой изгибающий момент в пределах 10–20 %.

2 .Эффективность от эксплуатации корабля, судна определяется увеличением грузоподъёмности до 6,5 ÷ 15% от водоизмещения без затрат на повышение прочности корпуса. Это

относится к кораблям и судам с размерениями  $L=80$  м и более, для которых вес дополнительного перевозимого груза достигает значений 50÷600 т и более.

3. Предлагаемые варианты размещения грузов повышают безопасность эксплуатации корпусов кораблей и судов благодаря уменьшению волнового изгибающего момента действием сил инерции при кильевой качке судна. В результате деградация корпусной стали или процессы развития её структурной повреждённости сдерживаются, тем самым сохраняется ресурс корпуса корабля и гражданского судна на высоком уровне при длительной эксплуатации.

4. Использование для кораблей и судов в эксплуатации предлагаемого способа балластировки (загрузки) позволяет повысить эксплуатационные показатели за счёт улучшения мореходных и прочностных качеств судна на морском волнении. Небольшим перераспределением посредством дополнительно принимаемого груза, в том числе и балласта, весовая нагрузка оптимизируется по волнению, а судно или корабль переводятся в оптимальный режим штормового плавания.

*Исследование выполнено в рамках госзаказа Министерства образования и науки России, проект 543.*

### Литература

1. Барабанов Н.В., Иванов Н.А., Новиков В.В., Шеменджук Г.П. Повреждения и пути совершенствования судовых конструкций. – Л: Судостроение. 1986. 221 с.
2. Новиков В.В., Турмов Г.П. Эксплуатационный износ судна: Монография.– Владивосток: Издательский дом ДВФУ. 2013. 200 с.
3. Казанов Г.Т. Обеспечение и контроль ресурса корпусов кораблей и судов Механика и процессы управления. Том 4 // Материалы XXXXII Всероссийского симпозиума. – М.: РАН, 2012. С. 133–144.
4. Антоненко С.В., Суров О.Э. Исследование влияния несимметричного распределения нагрузки на волновые изгибающие моменты. Проблемы прочности и эксплуатационной надежности судов // Труды Международной конференции. – Владивосток: ДВГТУ,1999. С. 141–145.
5. Charicteristics of distribution mass of ship hull in detachmentes on wave loades of low and high frequency. G.T. Kazanov, V.V. Novikov, T.A. Shatrak, K.V. Sheveleva, Proc. Fourteenth Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, TEAM'2000 Vladivostok, Russia, 18–21 September, 2000. P. 447–452.
6. Казанов Г.Т., Новиков В.В., Турмов Г.П. Концентрация напряжений и другие особенности напряженного состояния судовых корпусных конструкций: Монография. – Владивосток. Дальневост. Федерал. Ун-т. .2014.178 с.

### References

1. Barabanov N.V., Ivanov N.A., Novikov V.V., Shemendyuk G.P. Povrezhdeniya i puti sovershenstvovaniya sudovykh konstruktsiy. L: Sudostroenie. 1986. 221 s.
2. Novikov V.V., Turmov G.P. Ekspluatatsionnyy iznos sudna. Monografiya. Vladivostok: Izdatel'skiy dom DVFU. 2013. 200 s.
3. Kazanov G.T. Obespechenie i kontrol' resursa korpusov korabley i sudov Mekhanika i protsessy upravleniya. Tom 4. Materialy XXXXII Vserossiyskogo simpoziuma. M.: RAN, 2012. S. 133–144.
4. Antonenko S.V., Surov O.E. Issledovanie vliyaniya nesimmetrichnogo raspredeleniya nagruzki na volnovye izgibayushchie momenty. Problemy prochnosti i ekspluatatsionnoy nadezhnosti sudov. Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii. Vladivostok: DVGTU,1999. S. 141–145.
5. Charicteristics of distribution mass of ship hull in detachmentes on wave loades of low and high frequency. G.T. Kazanov, V.V. Novikov, T.A. Shatrak, K.V. Sheveleva, Proc. Fourteenth Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, TEAM'2000 Vladivostok, Russia, 18–21 September, 2000. P. 447–452.
6. Kazanov G.T., Novikov V.V., Turmov G.P. Kontsentratsiya napryazheniy i drugie osobennosti napryazhennogo sostoyaniya sudovykh korpusnykh konstruktsiy. Monografiya. Vladivostok. Dal'nevost. Federal. Un-t. 2014.178 s.

УДК 629.5.015.5

## О КОРРОЗИОННОМ ИЗНОСЕ И ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Миронов Алексей Сергеевич**, магистрант

Дальневосточный Федеральный Университет (ДВФУ) Инженерная школа ДВФУ

Владивосток, Россия

E-mail: leka1551@rambler.ru

**Новиков Валерий Васильевич**, кандидат технических наук

доцент кафедры кораблестроения и океанотехники

Дальневосточный Федеральный Университет (ДВФУ) Инженерная школа ДВФУ

Владивосток, Россия

E-mail: leka1551@rambler.ru

### АННОТАЦИЯ

Эксплуатационная надежность и ресурс конструкций корпуса морских судов зависят от многих факторов. Особое место занимают коррозионный износ и повреждаемость. При выборе размеров различных связей корпусов проектируемых судов пользуются средними скоростями износа, приведенными, например, в Правилах Регистра в зависимости от положения связи и типа судна. Знание скоростей износа важно также при планировании судоремонтных работ. Повышенный коррозионный износ приводит к появлению повреждений корпусных конструкций.

Обобщение и систематизация повреждений дают возможность выявить проблемные районы и дефектные конструктивные узлы, наметить пути их рационального технического обслуживания и ремонта. В работе проведен анализ коррозионного износа и повреждений конструкций корпуса морских судов по данным отечественных и зарубежных исследователей, обобщены выводы о повреждаемости судовых конструкций, приведены характерные примеры повреждений, связанных с коррозией.

**Ключевые слова:** скорость коррозии, износ конструкций, повреждаемость, конструкции корпуса судна, статистические данные.

## ABOUT CORROSION WEAR AND DAMAGEABILITY SHIP STRUCTURES

**Mironov Aleksey Sergeevich**, master student,  
Far Eastern Federal University, School of Engineering  
Vladivostok, Russia  
E-mail: leka1551@rambler.ru

**Novikov Valeriy Vasilevich**, PhD.,  
The Associate Professor of Shipbuilding and Ocean Engineerin  
Far Eastern Federal University, School of Engineering  
Vladivostok, Russia  
E-mail: leka1551@rambler.ru

### ABSTRACT

Operational reliability and service life of structures of marine vessel hulls depend on many factors. A special place is occupied by corrosive wear and damageability. When selecting the scantlings, the average rates of wear given, for example, in the Register Regulations depending on the scantling position and vessel type. Knowledge of the wear and tear rates is also important when planning ship repair operations. Increased corrosion wear causes damage to hull structures.

Generalization and systematization of the damages provides for an opportunity to identify problem areas and defective structural assemblies, identify ways of their rational maintenance and repair. The paper specifies the analysis of corrosive wear and damage of marine vessels hull structures according to domestic and foreign researchers' data, generalized conclusions about the damageability of vessel structures, and typical examples of damages caused by corrosion.

**Key words:** corrosion rate, wear of structures, damageability, hull structures of the vessel, statistics.

Коррозия является одной из главных причин износа и ослабления корпуса. В настоящее время на основе статистических данных накоплен обширный материал по коррозии корпусных конструкций, в том числе, и по скорости коррозионного износа, хотя приводимые в различных работах средние скорости износа колеблются в довольно широком диапазоне. Несмотря на достаточно полную разработку, проблема борьбы с коррозией еще не решена и требует дальнейшего изучения, так как для прогнозирования технического состояния корпусов кораблей и судов и оценки потребности в ремонте необходимо располагать данными о наиболее вероятных величинах износа корпусных конструкций. При этом необходимо учитывать условия эксплуатации, районы плавания и материалы, из которых изготовлены корпуса судов.

Особые районы, где происходят существенные коррозионные разрушения сварных соединений, - это сварные швы и зоны термического влияния. Различие в химическом составе основного металла и металла шва и в режимах сварки могут приводить к следующим видам разрушения: общая коррозия, коррозия шва, коррозия зоны термического влияния, коррозия металла, коррозия вдоль приварки набора.

Осмотры подводной части корпусов при доковых ремонтах выявляют существенные коррозионные разрушения сварных соединений, которые обнаруживаются на 50-60% обследуемых кораблей и судов [6]. Коррозионные разрушения наблюдаются на пазовых швах, особенно при ручной сварке. Стыковые швы имеют, как правило, точечно-язвенные поражения. Корабельные конструкции обычно подлежат замене или подкреплению, если глубины коррозионных язвин больше допустимых и распространяются более чем на 30% поверхности листа. При этом допускалась замена не всего листа, а наиболее поврежденного участка [4].

Коррозионный износ сварных соединений характеризуется степенью коррозионного поражения сварного шва как по размерам его сечения, так и по протяженности пораженного коррозией участка. Для сварныхстыковых соединений допускается общий коррозионный износ заподлицо с основным металлом. Угловые сплошные и прерывистые швы подлежат зачистке и заплавке, если износ валика превышает 25-30% его высоты.

На морских судах и кораблях местная коррозия развивается обычно уже в начальный период эксплуатации в местах корпуса, оголенных от краски вследствие повреждения покрытия. Постепенно коррозионные разрушения распространяются на большие площади и сливаются, образуя сплошной неравномерное коррозионное разрушение (рис. 1). Однако еще до этого глубокая язвенная коррозия может привести к свищам и более крупным сквозным разрушениям листов. В районе сварных соединений и в местах соединения разнородных металлов коррозионные разрушения могут иметь вид канавок. Подобный харак-

тер разрушения наиболее типичен для наружной обшивки корпуса. Средняя скорость общего коррозионного разрушения наружной обшивки составляет 0,08-0,16 мм/год, язвенной коррозии - 0,24-0,28 мм/год. Более интенсивно корродируют район переменной ватерлинии, носовая часть в районе буруна, кормовой подзор, ахтерштевень, места под шпигатами, у отверстий забортной арматуры, по сколовому поясу.



Рис.1. Коррозионное разрушение бортовой обшивки научно-исследовательского судна «Григорий Максимов»

При плавании судов во льдах коррозионный износ усугубляется истиранием поверхности листов, и скорость утонения скуловых и некоторых других листов обшивки может удваиваться [6]. Палубный настил подвергается усиленной коррозии в местах скопления и стока воды, у стенок надстроек и комингсов люков (рис. 2, 3), у шпигатов, под иллюминаторами, умывальниками, грелками парового отопления, под деревянным настилом, под мастичными или цементными перекрытиями.



Рис. 2. Коррозия палубы в районе надстройки супертраулера «Президент Пик»  
(Фото сделано в п. Славянка в октябре 2002г., а спустя два месяца судно затонуло в желтом море во время шторма)



Рис. 3. Повреждение колонки вследствие утонения стенки в результате коррозии на верхней палубе танкера «Владимир Колечицкий»

Набор корпуса (шпангоуты, бимсы, флоры, стойки переборок) избирательно корродируют в

местах скопления влаги, в топливных цистернах. У бортовых стрингеров в неизолированных помещениях более интенсивно подвергаются коррозии стенки. Переборки подвергаются коррозии в основном в нижней части, особенно у льял, а настил второго дна – в районе машинного и особенно котельного отделений. Весьма интенсивно подвергаются коррозионному износу стальные конструкции в местах соединения с алюминиевыми сплавами, например, в узлах присоединения рубок к стальному корпусу Средняя скорость коррозии в этих местах может достигать 0,4-0,6 мм/год.

Сопоставление данных об износе танкеров и сухогрузных судов (табл. 1, 2) свидетельствует о более значительном износе конструкций танкеров [8].

Таблица 1

**Скорости коррозии сухогрузных судов [8]**

Наименование связи	Скорость, мм/год	Наименование связи	Скорость, мм/год
в средней части			
Горизонтальный киль	0.252	Горизонтальный киль	.230
Днищевая обшивка	0.174	Днищевая обшивка	0.121
Скула	0.206	Скула	0.103
Обшивка борта	0.152	Обшивка борта	0.119
Ширстрек	0.078	Ширстрек	0.080
Вертикальный киль	0.005	носовая оконечность	
Флоры	0.018	Днищевая обшивка 09Г2	0.333
Шпангоуты	0.035	Днищевая обшивка ОУС	0.202
Бимсы	0040		

Таблица 2

**Скорость распространения язвенной коррозии на танкерах [8]**

Дедвейт, тыс. т	Сталь	Число судов	Скорость поражения коррозией	
			Обшивка днища	Сварные швы днища
40	10ХСНД	10	0,76	0,66
30	10ХСНД	4	0,76	0,78
11	СХЛ-1	14	0,43	0,32
20	09Г2	1	0,78	0,83
12	Ст4С	1	0,68	0,68
35	Ст4С	2	0,44	0,44



*Рис. 4. Коррозия конструкций рубки РТМС «Курилы». В возраст судна 28 лет. Судно прошло ремонт и докование в 2005 г. (фото 2006 г.)*

Как показывает практика эксплуатации, сухогрузные суда имеют ряд районов, где отмечается особенно повышенная коррозия. К таким районам относятся: горизонтальный киль, листы днищевой обшивки, скуловой пояс, нижние участки шпангоутов у соединения их со скуловой кницей, участки нижних палуб, прилегающих к борту. Наружная обшивка, изнашивается снаружи и изнутри. Внутренняя поверхность изнашивается от коррозии вследствие того, что на поверхности происходит конденсация влаги. Снаружи ниже ватерлиний происходит электрохимическая коррозия, которая в районе переменных ватерлиний усиливается аэрацией воды. В надводной части происходит переменное смачивание, попадание брызг, воздействие морских туманов. Внутри корпуса наружная обшивка более интенсивно поражается под иллюминатором, в цепном ящике, у шпигатов, в бортовых льялах, у приемных сеток систем, в балластных цистернах. Скорость коррозии внутри трюмов незначительная. Меньше всего изнашивается набор в трюмах, твиндеках за исключением тех мест, где скапливаются грязь и влага.

В табл. 1 приводятся износы различных районов корпуса группы судов дедвейтом  $DW = 3800\text{т}$ , которые эксплуатировались в морях Европы в западном секторе Арктики и Атлантике. Корпус изготовлен из обычной углеродистой стали. Продолжительность эксплуатации судов - 12 лет.

Коррозия конструкций танкеров вызывает значительный ущерб. За десятилетний срок эксплуатации некоторых танкеров приходится заменять примерно 20-30% всех связей корпуса. Коррозия распространяется по площади связей неравномерно. Разница в износе отдельных районов одной и той же связи может достигать в три и более раз. Износу подвергаются все связи танков.

Наибольший износ наблюдается в отбойном листе и связях палубы, которые подвержены переменному воздействию жидких грузов.

У танкеров интенсивная язвенная коррозия является следствием наличия серы в грузе и балластировки танков морской водой. Особенно сильно поражаются горизонтальные поверхности. Ско-

рость язвенной коррозии на танкерах различного водоизмещения составляет 0,4-0,8 мм/год.

Можно заключить, что коррозионные процессы, протекающие в конструкциях корпуса, зависят от многих факторов [5]. Основными из них являются:

- особенности окружающей среды (ледовые условия; соленость морской воды; температура воды и воздуха; виды обрастающих организмов; скорость обтекания; степень загрязнения моря);

- вид и качество антакоррозионной защиты (стойкость покрытий, правильность их нанесения; расположение и эффективность электрохимической защиты);

- уровень технического обслуживания корпуса и технического надзора за ним (периодичность докования; своевременное восстановление покрытий в процессе эксплуатации, качество работ);

- антакоррозионная стойкость стали; совместность сталей разных марок; совместимость электродов и основного металла; режимы сварки и др.);

- конструкция корпуса и технология его изготовления (наличие зон, где могут скапливаться различные загрязненные частицы и влага; возможность доступа для осмотра конструкций; удаление окалины и защита поверхности металла в процессе постройки и ремонта; температурные режимы гибки, правки и сварки корпусных конструкций и др.).

- скорость коррозии в значительной степени возрастает с повышением температуры среды. Скорость коррозии конструкций корпуса судов, которые эксплуатировались в тропических морях, оказывается в 2-2,5 раза интенсивнее, чем в обычных условиях.

По данным обследования судов различного назначения, эксплуатирующихся в основном в морях Дальнего Востока, отмечено следующее [13]:

- наибольшая коррозия наблюдается на рыбопромысловых судах (рис. 4) после возвращения судна с промысла - даже на судах, проходящих ежегодное техническое освидетельствование, регулярное докование и все необходимые виды ремонта;

- самые существенные разрушения были зафиксированы на малых рыболовных судах, которые в течение 5 лет вели промысел в тропиках (Южная Африка). При этом ремонтные работы в течение этого времени не производились;

- на танкерах наиболее интенсивная коррозия наблюдалась в танках;

- после достижения судном возраста 20-22 года даже при проведении необходимых регулярных ремонтных работ и технического обслуживания скорость коррозионного разрушения существенно увеличивается;

- большое влияние на скорость коррозии оказывают качество и периодичность технического обслуживания. Удаление окалины, покраска по-

верхностей, своевременное восстановление пропректорной защиты снижает скорость коррозии.

Совершенно очевидно, что количество повреждений судовых конструкций от коррозии с годами увеличивается. Анализ и систематизация повреждений позволяет заключить, что число повреждений конструкций на танкерах достигает максимальной величины к 12 годам эксплуатации (рис. 5), а на сухогрузных судах - к 17 годам (рис. 6).

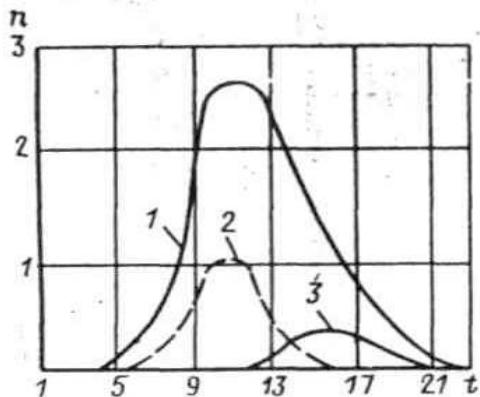


Рис. 5. Количество повреждений в конструкциях танкеров [7]:

1 – полное число; 2 – в ребрах водонепроницаемых переборок; 3 – в наборе палуб; n – число случаев повреждений на одно судно в год, %; t – продолжительность эксплуатации судов, годы

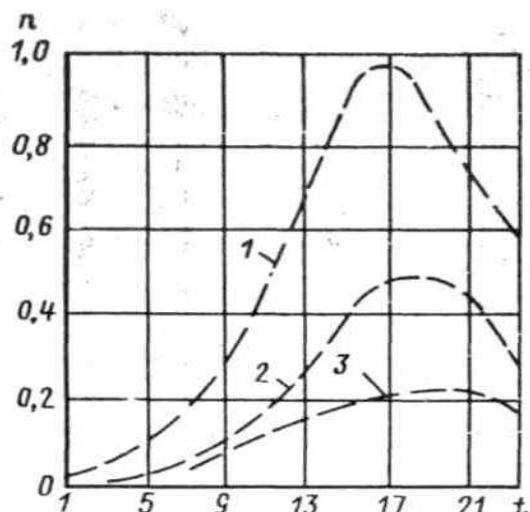


Рис. 6. Количество повреждений от коррозии судов, перевозящих генеральные грузы [7]:

1 – полное число; 2 – в шпангоутах трюмов; 3 – в бимсах и продольных ребрах; n – число случаев повреждений на одно судно в год, %; t – продолжительность эксплуатации судов, годы

Коррозионный износ уменьшает размеры связей, обеспечивающих общую и местную прочность. Поэтому в районах с повышенным износом возникают повышенные напряжения, которые вызывают повреждения, особенно связей с высокой концентрацией напряжений. Очаги концентрации создают также язвенную коррозию, которая в сочетании с общей коррозией может стать источниками

возникновения начальных хрупких и усталостных трещин. Большой коррозионный износ обшивки и набора часто является причиной возникновения повреждений в виде остаточных деформаций, которые могут привести к самым серьезным авариям, особенно на судах с тонкой обшивкой. Износ обшивки и набора для судов, перевозящих разные грузы, различен. Например, на нефтепаливных судах наибольший износ наблюдается в районе верхней палубы, в то время как продольные ребра жесткости и продольные переборки в районе днища корродируют значительно меньше. Это приводит к заметному уменьшению момента сопротивления верхнего пояса эквивалентного бруса и соответственно увеличению напряжений в связях, что может сопровождаться появлением остаточных деформаций и трещин в обшивке и в наборе.

В случае уменьшения момента сопротивления против первоначальной величины до предельного значения (более, чем на 10%), дальнейшая эксплуатация судна недопустима до проведения необходимого ремонта либо изменения района плавания и снижения грузоподъемности. При наличии в отдельных поперечных сечениях чрезмерного износа несущих продольных связей целесообразно экспериментальное определение фактического уменьшения момента сопротивления поперечного сечения корпуса.

Необходимость совершенствования конструкций корпуса и соответствующих расчетных методик взаимосвязаны с изучением причин [1,2,11,12 и др].

Для определения различных факторов на повреждаемость конструкций используются статистические методы - корреляционный и дисперсионный анализы. Сделанные на основании проведенного исследования [12] выводы о повреждаемости конструкций корпусов сухогрузных и нефтепаливных судов представляют несомненный интерес:

- отмеченные повреждения носят в основном местный характер и вызваны конструктивными и технологическими дефектами, допущенными при проектировании, постройке и ремонте, или нарушениями правил технической эксплуатации;

- среднее время возникновения трещины в различных конструкциях корпуса судна неодинаково и составляет от 3,4 до 10,0 лет;

- максимальное количество деформаций (вмятин, гофрировок, потеря устойчивости) наблюдается в момент достижения возраста судном 3,5-4 года, а затем оно уменьшается. Отчасти это объясняется плановыми ремонтными работами, выполняемыми именно в этот период;

- максимальное число повреждений отмечается после эксплуатации в течение 6 и 13 лет. При этом за четыре года – с 4,5- до 8,5 лет возникает 46% повреждений. Объясняется это, по мнению авторов, влиянием коррозии на прочность конструкций и на их усталостную долговечность, в связи с образованием коррозионных очагов концентрации напряжений;

– явно выраженные дефекты конструкций уменьшают срок их службы на 1,5–2 года.

Развитие компьютерных технологий позволило создать банк данных по техническому состоянию судов на основе компьютерной системы DEFHULL, [14]. Статистический анализ скоростей износа по некоторым судам одной серии выявил закономерности износов по длине, ширине и высоте корпуса танкера, которые существенно отличаются от нормативных скоростей износа, заложенных в Правила РС. В частности, отмечено [15], что скорости износа в балластных танках значительно выше, чем в грузовых, но с существенными особенностями для верхней части балластных танков, включая настил и набор верхней палубы, обеспечивающих общую прочность корпуса.

Зарубежный анализ результатов статистического исследования причин появления дефектов в корпусе [7] (обследовалось 5341 судно за 1981 год) также свидетельствует о том, что имеется ясно выраженная зависимость числа случаев повреждений на одно судно в год от изменения продолжительности эксплуатации судов (рис. 7).

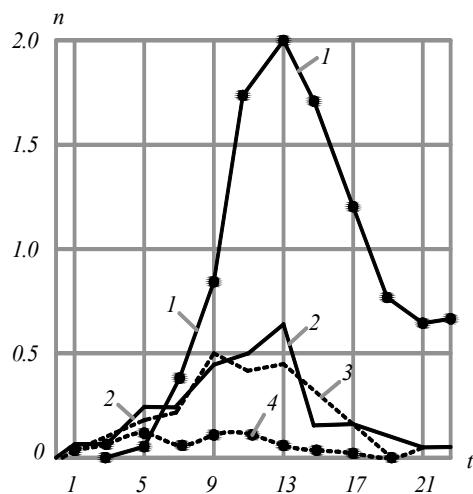


Рис. 7. Сравнительные данные о повреждениях судов [7] по следующим причинам:  
 1 – коррозия; 2 – ошибки проектирования;  
 3 – эксплуатационные ошибки;  
 4 – вибрация; n – повреждения на одно судно в год;  
 t – годы эксплуатации

Все пики кривых соответствуют времени эксплуатации судов от 9 до 15 лет. Большинство повреждений произошло по причине коррозионного износа связей; затем по численности идут повреждения, возникшие вследствие ошибок, допущенных при проектировании; повреждения, вызванные ошибками судоводителей при управлении судами в море во время шторма и, наконец, повреждения, полученные под воздействием вибрации.

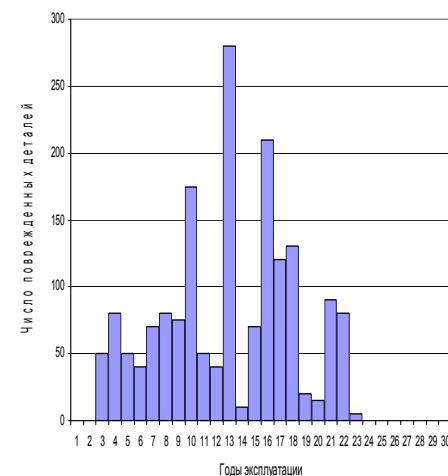


Рис. 8. Полигон числа повреждений в зависимости от возраста судов

Потенциальная вероятность эксплуатационных повреждений корпусных конструкций обусловлена ошибками при проектировании и строительстве или недостаточно достоверным учетом нагрузок. Эта потенциальная возможность приводит к появлению повреждений в тех случаях, когда они эксплуатируются в особо сложных и неблагоприятных условиях. К таким условиям относятся плавание судов во льдах, в условиях сильных штормов, швартовки в открытом море и др.

Характерными местами корпуса, в которых наиболее часто появляются трещины [1], являются районы различных вырезов в палубе и бортах, места резкого обрыва отдельных связей корпуса по длине корабля и места изменения поперечного сечения ребер набора (как продольного, так и поперечного), рубки и надстройки, конструкции с «жесткими точками», узлы и соединения, работающие в условиях вибрационных нагрузок (рис. 9, 10).



Рис. 9. Разрушение конструкции угла люкового выреза на т/х «Виктория». (Фото 2010 г.)



*Рис. 10. Трещина (закрыта накладной полосой) в верхней палубе в районе пересечения стенок рубки и переборки под палубой («жесткая точка») на т/х «Остров Карагинский» (Фото 2009 г.)*

При больших пластических деформациях в конструкциях с вырезами и «жесткими точками» могут возникать мелкие трещины уже при 3-5% относительного удлинения и с течением времени развиваться до опасных размеров, а при неблагоприятных погодных условиях (сильный шторм при низких температурах) трещины могут быстро распространяться как хрупкие до полного разрушения конструкций.

В работе [5] приводятся следующие данные. В 1969г Английский Ллойд опубликовал статистику повреждений подведомственных ему судов за период с 1891 по 1966 гг. Согласно этим данным основная причина вывода судов из эксплуатации (50-60%) – различного рода повреждения в виде трещин, вмятин, требующие выполнения ремонтных работ. Основным типом повреждений являются трещины, на долю которых приходится более 91% всех случаев вывода судов из эксплуатации для ремонта.

Японской Ассоциацией судостроителей было обследовано 1200 судов, построенных в период 1950-1969гг. [10]. На 100 судах обнаружены 144 трещины в листах верхней палубы и наружной обшивки, что отвечает вероятности возникновения опасных трещин порядка 8%. Обнаруженные трещины, в основном усталостного происхождения, были обусловлены повторяющимися эксплуатационными нагрузками. Источниками таких трещин оказались различного рода прерывистости.

В США была произведена систематизация повреждений, обнаруженных при осмотрах конструктивных узлов различных судов (в том числе 9 военных) на семи судоремонтных заводах [9]. Рассмотрены суда в возрасте от 4 до 30 лет. Полигон числа повреждений деталей судов, построенный в функции от их возраста, показывает сложную зависимость количества повреждений от срока службы (рис.8). На основании этих исследований можно сделать следующие обобщения:

- повреждения проявляются главным образом в виде трещин в тяжело нагруженных связях, в том числе обеспечивающих продольную прочность;
- источниками трещин служат места повышенной концентрации напряжений;
- причиной возникновения трещин является в основном дефекты проектирования и изготовления, а также перегрузки, обусловленные тяжелыми погодными условиями;
- количество появляющихся повреждений практически не зависит от возраста судна.

## Заключение

Несмотря на постоянное совершенствование конструкций судов, все еще встречаются значительные повреждения корпуса. Даже на судах новой постройки повреждение конструкций корпуса – нередкое явление.

Основной причиной опасных повреждений судовых конструкций является малоцикловая усталость, связанная с повышенными уровнями циклических напряжений, возникающих в местах повышенной концентрации напряжений при тяжелых погодных условиях.

Частота повреждаемости заметно увеличивается в районах судовых конструкций, подвергающихся усиленному коррозионному износу, что свидетельствует о необходимости систематизации повреждений и создания соответствующих банков данных по группам судов различного назначения.

*Исследование выполнено при поддержке Программы «Научный фонд» ДВФУ в рамках исполнения обязательств по соглашению № 12-08-13021-21/13.*

## Литература

1. Барабанов Н.В., Иванов Н.А., Новиков В.В., Шемендуок Г.П. Повреждения и пути совершенствования судовых конструкций. – Л: Судостроение. 1986. 221 с.
2. Барабанов Н.В., Иванов Н.А., Новиков В.В., Окишев В.А., Чибиряк И.М. Повреждения судовых конструкций. – Л: Судостроение. 1977. 399 с.
3. Чибиряк И.М. Основы дефектации судовых конструкций: Учебн. пособие. ДВГТУ. – Владивосток. 1995. 88 с.
4. Правила эксплуатации металлических корпусов, устройств и систем надводных кораблей и вспомогательных судов ВМФ. – М.: Воениздат, 1972. 248 с.
5. Оценка технического состояния корпусов морских судов / А.И. Максимаджи, Л.М. Беленький, А.С. Брикер, А.Ю. Неугодов. – Л: Судостроение, 1982. 156 с.

6. Телянер Б.Е., Турмов Г.П., Финкель Г.Н. Технология ремонта корпуса судна. –Л.: Судостроение, 1984. 288 с.
7. Akita Y. Statistical Trend of Ship Hull Failure//PRADS,83.The 2nd International Symposium on Practical Design in Shipbuilding. Tokio: Secut.1983. 619–624 p.
8. Antoniou A.C. Survey on CrackS in Tankers under Repairs. PRADS.Tokio: 1977.143–150 p.
9. Jordan C., Cjchran C. In Service Performance of Structural Details, SSC272, USA, 1978. 188 p.
10. International Ship Structures Congress, 6th,Boston: 1976,Proceedings, vol.1. 265 p.
11. Гаврилов М.Н., Брикер А.С., Эпштейн М.Н. Повреждения и надежность корпусов судов. – Л.: Судостроение, 1978. 216 с.
12. Юнитер А.Д. Повреждения и ремонт корпусов морских судов.– М: Транспорт. 1973. 216 с.
13. Эксплуатация судового корпуса. Брикер А.С., Валько Н.Г. ,Гаврилов М.Н., Непочатых Н.М., Яковский Ф.Н. Научно-техническая информация ЦБНТИ ММФ (подготовленная ЦНИИМФ). 87(262).– М: 1971. 80 с.
14. Новиков В.В., Турмов Г.П. Эксплуатационный износ судна: Монография. – Владивосток: Издательский дом ДВФУ. 2013. 200 с.
15. Кулеш В.А., Суров О.Э., Житников А.В. Система DEFHULL – инновационная технология управления технической эксплуатацией флота // Вестник Дальневосточного государственного технического университета. 05.00.00 Технические науки. 2010 г. № 3 (5).
16. Житников А.В., Кулеш В.А. Исследование скоростей и закономерностей износа танкеров типа «Калининграднефть». Исследования по вопросам повышения эффективности судостроения и судоремонта. – Владивосток: ДВГТУ. 2004. 147–160 с.

### References

1. Barabanov N.V., Ivanov N.A., Novikov V.V., Shemendyuk G.P. Povrezhdeniya i puti sovershenstvovaniya sudovykh konstruktsiy. L: Sudostroenie. 1986. 221 s.
2. Barabanov N.V., Ivanov N.A., Novikov V.V., Okishev V.A., Chibiryak I.M. Povrezhdeniya sudovykh konstruktsiy. L: Sudostroenie. 1977. 399 s.
3. Chibiryak I.M. Osnovy defektatsii sudovykh konstruktsiy. Uchebn. posobie. DVG TU. Vladivostok. 1995. 88 s.
4. Pravila ekspluatatsii metallicheskikh korpusov, ustroystv i sistem nadvodnykh korabley i vspomogatel'nykh sudov VMF. M.: Voenizdat. 1972, 248 s.
5. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya korpusov morskikh sudov. A.I. Maksimadzhi, L.M. Belen'kiy, A.S. Briker, A.Yu. Neugodov. L.: Sudostroenie. 1982. 156 s.
6. Telyaner B.E., Turmov G.P., Finkel' G.N. Tekhnologiya remonta korpusa sudna. L.: Sudostroenie. 1984. 288 s.
7. Akita Y. Statistical Trend of Ship Hull Failure//PRADS,83.The 2nd International Symposium on Practical Design in Shipbuilding. Tokio: Secut.1983. 619–624 p.
8. Antoniou A.C. Survey on CrackS in Tankers under Repairs. PRADS.Tokio: 1977.143–150 p.
9. Jordan C., Cjchran C. In Service Performance of Structural Details, SSC272, USA, 1978. 188 p.
10. International Ship Structures Congress, 6th,Boston: 1976,Proceedings, vol.1. 265 p.
11. Gavrilov M.N., Briker A.S., Epshteyn M.N. Povrezhdeniya i nadezhnost' korpusov sudov. L.: Sudostroenie. 1978. 216 s.
12. Yuniter A.D. Povrezhdeniya i remont korpusov morskikh sudov. M: Transport. 1973. 216 s.
13. Ekspluatatsiya sudovogo korpusa. Briker A.S., Val'ko N.G. ,Gavrilov M.N., Nepochatykh N.M., Yakovskiy F.N. Nauchno-tehnicheskaya informatsiya TsBNTI MMF (podgotovlennaya TsNIIMF). 87(262). M: 1971. 80 s.
14. Novikov V.V., Turmov G.P. Ekspluatatsionnyy iznos sudna. Monografiya. Vladivostok: Izdatel'skiy dom DVFU. 2013. 200 s.
15. Kulesh V.A., Surov O.E., Zhitnikov A.V. Sistema DEFHULL – innovatsionnaya tekhnologiya upravleniya tekhnicheskoy ekspluatatsiey flota. Vestnik Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 05.00.00 Tekhnicheskie nauki. 2010. № 3 (5).
16. Zhitnikov A.V., Kulesh V.A. Issledovanie skorostey i zakonomernostey iznosa tankerov tipa «Kalininogradneft». Issledovaniya po voprosam povysheniya effektivnosti sudostroeniya i sudoremonta. Vladivostok: DVG TU. 2004. 147–160 s.

## *Морское приборостроение*

УДК 534.142.1

### ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ЗВУКА – ТЕРМОФОНЫ

**Легуша Федор Федорович**, профессор, доктор физико-математических наук, профессор,  
Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет

Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: legusha@smtu.ru

**Невеселова Ксения Васильевна**, аспирантка, младший научный сотрудник  
Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет  
Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: neve\_ksyunik@mail.ru

#### АННОТАЦИЯ

Существует несколько способов очистки балластных вод на судах. Среди них наиболее Развитие современных технологий, в том числе и нанотехнологий, позволяет по-новому взглянуть на практические применения термоакустических источников звука – термофонов. Современные термофоны имеют высокую механическую прочность, могут быть изготовлены из химически чистых материалов, параметры которых не изменяются во времени и при воздействии на них интенсивных физических полей различной природы. Этой позволяет построить широкополосные нерезонансные источники звука, которые найдут широкое применение в различных областях науки и техники. В результате выполнения работы показано, что при расчёте амплитуды переменной температуры активного элемента термофона потерями тепла в газообразную среду можно пренебречь. Изменение пористости вещества подложки влияет как на её теплофизические параметры, так и на амплитуду механических колебаний свободной поверхности подложки. Наличие этих колебаний приводит к излучению дополнительной звуковой волны. Предложенная в работе методика расчёта акустических параметров даёт результаты, хорошо совпадающие с экспериментальными данными, полученными другими авторами, в диапазоне частот от 2,0 до 30,0 кГц.

**Ключевые слова:** термофон, переменный электрический ток, переменная температура, тепловая волна, звуковая волна, широкополосный источник звука, активный элемент, пористый кремний.

### BROADBAND THERMO-ACOUSTIC SOUND SOURCES – THERMOPHONES

**Legusha Fedor Fedorovich**, the professor, Dr.Sci.Phys.-Math., the professor  
State Marine Technical University of St. Petersburg  
Sankt-Petersburg, Russia  
E-mail: legusha@smtu.ru

**Neveselova Kseniya Vasil'evna**, Student, the junior researcher  
State Marine Technical University of St. Petersburg  
Sankt-Petersburg, Russia  
E-mail: neve\_ksyunik@mail.ru

#### ABSTRACT

The development of modern technologies, including nanotechnologies, enables new vision at the practical use of the thermoacoustic sound sources - thermophones. Modern thermophones of high mechanical strength, could be produced from chemically pure materials which parameters display no time variation when subjected to intense fields of different physical nature. This allows to develop the broadband non-resonant sound sources, which in turn could be widely used in the various fields of science and technology. The results show that the magnitude of thermal losses in the gaseous medium could be ignored, while calculating the range of the thermophone active element alternate temperature. Change of the substrate material porosity affects both its thermophysical parameters and the range of the substrate free surface mechanical vibrations. These vibrations account for the emission of extra

sound wave. The proposed method of acoustic parameters calculation agrees well with the experimental data obtained by other authors within the frequency range 2,0–30,0 kHz.

**Key words:** Thermophone, alternating electric current, variable temperature, thermal wave, sound wave, broadband sound source, active element, porous silicon.

## Введение

Согласно Л. Беранеку [1], первые эксперименты, в которых исследовался термоакустический эффект, были проведены в 1907 году русским железнодорожным инженером И. Гоздевым. Теория термоакустических источников звука – термофонов была разработана в 1917 году Х.Д. Арнольдом и И.Б. Крэндалом [2]. Несколько позже методика расчёта акустических параметров термофонов была уточнена Э.К. Вентом [3]. До середины прошлого века термофоны использовались в качестве первичных источников звука при проведении калибровки измерительных микрофонов.

Развитие современных технологий, в том числе и нанотехнологий, возродило интерес к термоакустическим источникам звука. При этом предлагаются использовать термофоны в качестве источников звука, обеспечивающих работу различных технических устройств [4]. Конструктивное исполнение современного термофона претерпело существенные изменения, но остаётся достаточно простым, что обеспечивает технологические возможности его изготовления.

## 1. Устройство термофона

Процесс термоакустического излучения звука не является резонансным. В термофоне энергия переменного электрического тока напрямую преобразуется в звуковые волны, что позволяет ему работать в широкой полосе частот. В настоящее время изготовлены и испытаны термофоны, работающие в диапазоне от единиц до 100 кГц. Амплитуда звукового давления, создаваемого термофоном, пропорциональна электрической

мощности, подводимой к его активному элементу. Внутреннее сопротивление термофона зависит от особенностей конструкции его активного элемента и является чисто омическим электрическим сопротивлением.

Структурная схема классического термофона показана на рис. 1, а. Согласно этой схеме активный элемент термофона – 1 посредством теплоизоляционных стоек – 2 закрепляется на пластине – 3. Если по проводнику течёт переменный электрический ток  $I(f)$ , то за счёт джоулевых потерь на поверхностях проводника возникает переменное температурное поле, генерирующее в окружающее проводник вещество, неоднородные тепловые волны. Появление тепловых волн в веществе приводит к периодическим изменениям его акустических параметров и, как следствие этого, к возникновению в пространстве бегущей звуковой волны.

В настоящее время существуют два основных режима электрического возбуждения термофонов [1-3]:

1) через активный элемент термофона одновременно текут постоянный электрический ток  $I_0$  и переменный ток с амплитудой  $I_m$ ; если  $I_0 \gg I_m$ , то излучаемая звуковая волна имеет частоту  $f$ , соответствующую частоте переменного тока; если  $I_0$  и  $I_m$  одинакового порядка величины, то в спектре излучения термофона имеются звуковые волны с частотами  $f$  и  $2f$ .

2) через активный элемент термофона течёт только переменный электрический ток с амплитудой  $I_m$  и частотой  $f$ , излучаемая термофоном звуковая волна имеет частоту  $2f$ .

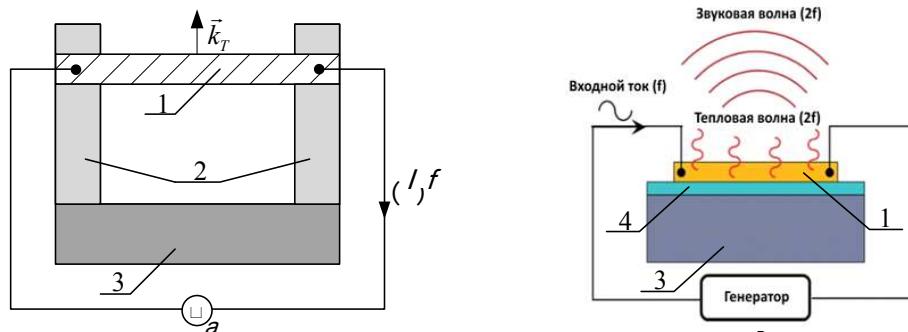


Рис. 1. Структурная схема термофонов: а) классическая; б) новый вариант:  
1 – активный элемент; 2 – теплоизоляционные стойки; 3 – пластина; 4 – подложка

На практике чаще всего используется второй режим возбуждения термофона, так как этот режим наиболее просто реализовать технически. Например, в этом режиме возбуждения были проведены испытания термофонов, выполненных

по классической схеме, активные элементы которых изготовлены из тонкой никромовой проволоки [4, 5]. В дальнейшем все выкладки мы производим, полагая, что через активный элемент тер-

мофона течёт только переменный электрический ток.

В работах [1-3] показано, что амплитуда звукового давления, создаваемого термофоном, пропорциональна амплитуде переменной температуры  $T'_m \sim 1/h^2$ . Следовательно, увеличение акустической эффективности термофона может быть обеспечено за счёт уменьшения толщины проводника  $h$  (или радиуса проводника), когда активный элемент формируется из проволоки). При создании классических термофонов [1-3] использовалась металлическая фольга толщиной  $h = 5,0\ldots7,0$  мкм. Механическая прочность такой фольги невелика и дальнейшее уменьшение её толщины не позволяет технически реализовать термофоны, выполненные по классической схеме. Сохранение целостности очень тонкого проводника может быть обеспечено только в том случае, когда слой проводника жёстко связан с поверхностью другого твёрдого тела, имеющего достаточную механическую прочность. Именно этот технологический приём использован при создании современных термофонов [6, 7].

Структурная схема современного термофона представлена на рис. 1, б. Активный элемент термофона – 1 нанесён на верхнюю поверхность подложки – 4, которая в свою очередь закреплена на верхней поверхности пластины – 3. Работа устройства отличается от работы классического термофона лишь тем, что тепловая волна, зародившаяся на нижней поверхности активного элемента, распространяется не в газе, а в веществе, из которого изготовлена подложка. Условия формирования звуковых волн на верхней поверхности активного элемента не изменяются. Существуют также варианты изготовления термофонов, в которых подложка отсутствует, и активный элемент сформирован непосредственно на поверхности пластины [8].

Активные элементы современных термофонов могут быть сформированы в виде очень тонких электропроводящих слоёв, для формирования которых могут быть использованы: металлы, углеродные нанотрубки, графен, оксид индия и олова и др. В работе [7] показано, что наибольшую акустическую эффективность термофона обеспечивают тонкие электропроводные слои, изготовленные из металлов. Эти слои наносятся на поверхность твёрдого тела методом напыления, который в настоящее время широко используется при производстве современных радиокомпонентов. Толщина активного элемента может составлять несколько десятков нанометров. Например, созданы и прошли испытания термофоны, у которых активные элементы, изготовленные из алюминия и золота, имели соответственно толщину 30 нм и 40 нм [6, 7].

Для повышения акустической эффективности термофона между его активным элементом и поверхностью механической основы вводят теплоизоляционный слой – подложку (см. рис. 1, б).

При изготовлении подложек чаще всего используют пористый кремний [6] или пористые полимеры [7]. Изменение пористости материала позволяет легко управлять тепловыми свойствами подложки, что в свою очередь позволяет оптимизировать акустические параметры устройства.

Пластина термофона обеспечивает ему необходимую механическую прочность. Площадь несущей поверхности пластины делают достаточной для формирования на ней излучающей поверхности термофона. Физические параметры вещества пластины выбирают из условия обеспечения стабильной работы термофона во время его эксплуатации.

## 2. Расчёт акустических параметров термофона

Для проведения расчётов воспользуемся схемой, показанной на рис. 2.

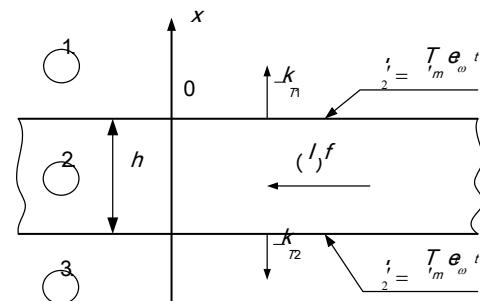


Рис. 2. Схема расчёта: 1 – верхнее полупространство (газ или жидкость); 2 – активный элемент термофона; 3 – нижнее полупространство (твердое тело);  $I(f)$  – переменный электрический ток;  $\bar{k}_{T_1}$  и  $\bar{k}_{T_3}$  – тепловые волны, распространяющиеся в верхнее и нижнее полупространство соответственно

Согласно решению задачи об излучении звука плоской поверхностью, температура которой изменяется по гармоническому закону, колебательная скорость в волне, распространяющейся в верхнем полупространстве (см. рис. 2), определяется следующим выражением [9]

$$U_1 = \omega \zeta_1 = -i \omega \beta_{V1} \int_0^\infty T'_1(x) dx, \quad (1)$$

где  $\beta_{V1}$  – коэффициент теплового объёмного расширения среды, в которой распространяется тепловая волна.

Уравнение движения неоднородной тепловой волны, распространяющейся вдоль от  $0x$  в верхнее полупространство, имеет вид

$$T'_1 = T'_m e^{-\frac{x}{\delta_{T1}}} \cos\left(\omega t - \frac{x}{\delta_{T1}}\right), \quad (2)$$

где  $T'_m$  – амплитуда переменной температуры поверхности активного элемента,  $\delta_{T1} = \sqrt{2a_1/\omega}$  – толщина теплового пограничного слоя в веществе.

стве верхнего полупространства,  $a_1$  – коэффициент температуропроводности среды.

Тепловая волна практически полностью затухает на расстоянии  $x = \lambda_{T1} = 2\pi\delta_{T1}$ . Здесь  $\lambda_{T1}$  – длина тепловой волны в веществе первого полупространства. Если в интеграле (1) в качестве верхнего предела принять  $x = \lambda_{T1}$  и подставить выражение (2), то после преобразований получаем формулу для расчёта амплитуды колебательной скорости

$$U_{01} = \omega\zeta_{01} = \sqrt{a_1\omega} \beta_{v1} T'_m, \quad (3)$$

где  $\zeta_{01}$  – амплитуда колебаний частиц среды.

В нижнее полупространство в отрицательном направлении оси  $0x$  (см. рис. 3, рис. 2) распространяется тепловая волна

$$T'_3 = T'_m e^{\frac{x}{\delta_{T3}}} \cos\left(\omega t + \frac{x}{\delta_{T3}}\right), \quad (4)$$

где  $\delta_{T3} = \sqrt{2a_3/\omega}$  – толщина теплового пограничного слоя в веществе нижнего полупространства,  $a_3$  – коэффициент температуропроводности среды.

В этом случае колебания температуры в приповерхностном слое вызывают колебания свободной поверхности твёрдого тела в плоскости  $x = 0$ . Если пренебречь толщиной активного элемента, то интеграл (1) принимает вид

$$U_3 = \omega\zeta_3 = -i\omega\beta_{v3} \int_{x=-\lambda_{T3}}^{\infty} T'_3(x) dx, \quad (5)$$

где  $\lambda_{T3} = 2\pi\delta_{T3}$  – длина тепловой волны в твёрдом теле,  $\beta_{v3}$  – коэффициент теплового объёмного расширения твёрдого тела.

Решая интеграл (5), получаем выражение для расчёта амплитуды колебательной скорости поверхности твёрдого тела

$$U_{03} = \omega\zeta_{03} = \sqrt{a_3\omega} \beta_{v3} T'_m, \quad (6)$$

где  $\zeta_{03}$  – амплитуда колебательной поверхности твёрдого тела.

Из формул (3) и (6) нетрудно заметить, что амплитуда колебательной скорости пропорциональна амплитуде переменной температуры поверхности активного элемента  $T'_m$ . Если предположить, что температура в веществе активного слоя определяется только теплопроводностью контактирующих сред, то это позволяет построить уравнение теплового баланса, из решения которого следует

$$T'_m = \frac{q_e}{\sqrt{\omega}(K_{H1} + K_{H3})}, \quad (7)$$

где  $q_e = 0,5R_e I_m^2/S$  – удельная мощность тепловыделения активного элемента;  $R_e$  – электрическое сопротивление;  $I_m$  – амплитуда переменного тока,  $S$  – площадь активного элемента;  $K_{H1} = \sqrt{\chi_1\rho_1C_{p1}}$ ;  $K_{H3} = \sqrt{\chi_3\rho_3C_{p3}}$ ,  $\chi$ ,  $\rho$  и  $C_p$  –

коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоёмкость сред.

Если выполняется условие  $K_{H1} \ll K_{H3}$ , то тепловыделением в верхнюю среду можно пренебречь. Формула (7) упрощается и принимает вид

$$T'_m = \frac{q_e}{\sqrt{\omega}K_{H3}}. \quad (8)$$

Как правило, формулу (8) можно применять, когда верхнее полупространство заполнено газами или парами умеренной плотности.

После подстановки выражения (7) в формулы (3) и (6) для амплитуд колебательных скоростей окончательно имеем:

$$U_{01} = \frac{\beta_{v1}\sqrt{a_1}q_e}{K_{H1} + K_{H3}}; \quad (9)$$

$$U_{03} = \frac{\beta_{v3}\sqrt{a_3}q_e}{K_{H1} + K_{H3}}. \quad (10)$$

Из формул (9) и (10) видно, что амплитуды колебательных скоростей звуковых волн, зарождающихся на поверхностях  $x = \lambda_{T1}$  и  $x = 0$ , не зависят от частоты. Величина этих амплитуд пропорциональна коэффициенту теплового объёмного расширения вещества, в котором распространяется тепловая волна. Если полупространство, в которое излучается звук, заполнено газом или жидкостью, то значение  $\beta_{v1}$  можно найти в справочной литературе. Для всех существующих в природе газов величины коэффициентов теплового объёмного расширения близки к значению  $\beta_{v1} = 1/273,15 \text{ К} = 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ , используемому нами при проведении расчётов.

Если полупространство 3 (см. рис. 2) является однородным твёрдым телом, то значение его коэффициента теплового объёмного расширения определяем по формуле  $\beta_{v3} = 3 \cdot a_3$ , где  $a_3$  – коэффициент теплового линейного расширения твёрдого тела. В случае, когда твёрдое тело имеет пористую структуру, то для расчёта значения его коэффициента теплового объёмного расширения можно в первом приближении использовать формулу

$$\beta_{v3p} = \frac{2}{3}n\beta_{v1}, \quad (11)$$

где  $n$  – пористость вещества в относительных единицах.

Пористость вещества изменяет теплофизические параметры твёрдого тела, на основе которого оно изготовлено. Это в свою очередь приводит к изменениям величины параметра  $K_{H3}$ , входящего в формулы (9) и (10). Из этих формул видно, что акустическая эффективность термофона тем выше, чем меньше величина  $K_{H3}$ .

Влияние пористости вещества на его тепловые параметры хорошо видно из данных, представленных в табл. 1. В этой таблице пористый кремний имеет пористость  $n = 0,7$ .

Таблица 1

Тепловые свойства кремния и плавленого кварца

	$\rho_3$ , кг/ $m^3$	$\chi_3$ , Вт/ $m \cdot K$	$C_3$ , Дж/ $kg \cdot K$	$K_{H3}$ , Вт/ $m^2 \cdot K \cdot c^{1/2}$
Кремний (Si)	2420	147	690	$1,6 \cdot 10^4$
Пористый кремний ( $pSi$ ) [4]	727	1,0	963	$8,4 \cdot 10^2$
Плавленый Кварц ( $SiO_2$ )	2203	1,38	703	$1,5 \cdot 10^3$

У идеального теплоизолятора  $K_{H3} = 0$ . В случае реального вещества, чем меньше значение коэффициента  $K_{H3}$ , тем лучше его теплоизолирующие свойства. Из табл. 1 видно, что  $K_{H3}$  пористого кремния практически на 2 порядка меньше значения  $K_{H3}$  кристаллического кремния. Однако  $K_{H3}$  плавленого кварца всего в 5,6 раза больше, чем  $K_{H3}$  пористого кремния. Это указывает на то, что существует возможность подобрать тепловые параметры вещества механической основы термофона, на которой не обязательно формировать подложку.

Представленные выше расчёты показывают, что акустическое поле над поверхностью активного элемента термофона представляет собой суперпозицию двух волн. Первая волна  $p_1(x,t)$  формируется в плоскости  $x = \lambda_{T1}$  и имеет амплитуду колебательной скорости (9). Вторая волна  $p_3(x,t)$  излучается за счёт колебаний поверхности твёрдого тела в плоскости  $x = 0$  и имеет амплитуду колебательной скорости (10). Звуковое давление, создаваемое в среде, можно найти из выражения

$$p(x,t) = p_1(x,t) + p_3(x,t). \quad (12)$$

Распределение амплитуды колебательной скорости в обоих случаях является равномерным. Следовательно, термофон можно считать поршневым источником звука. Если размеры излуча-

ющей поверхности термофона бесконечны, то вблизи его излучающей поверхности формируется плоская звуковая волна. Для амплитуд звукового давления, опуская множитель  $e^{i\omega t}$ , можно написать:  $p_1(x,t) = U_{01} \rho_1 c_1$ ;  $p_3(x,t) = U_{03} \rho_1 c_1$ .

В реальных случаях излучающая поверхность термофона  $S$  имеет конечные размеры и параметры создаваемого им акустического поля зависят от величины его волнового размера  $kr_0$ , где  $k = \omega/c_1$  – волновое число,  $r_0 = \sqrt{S/\pi}$  – радиус эквивалентного круглого источника звука. Проще всего построить распределение амплитуды звукового давления на оси круглого поршневого источника звука. Используя решение, имеющееся в работе [10], имеем:

$$p_1(x,t) = U_{01} \rho_1 c_1 \left( e^{-ik(x-\lambda_{T1})} - e^{-ik\sqrt{(x-\lambda_{T1})^2 + r_0^2}} \right); \quad (13)$$

$$p_3(x,t) = U_{03} \rho_1 c_1 e^{i\omega t} \left( e^{-ikx} - e^{-ik\sqrt{x+r_0^2}} \right). \quad (14)$$

Если выполняется условие  $x > x_\partial = r_0^2/\lambda$ , где  $\lambda$  – длина звуковой волны в верхней среде, то термофон излучает сферическую волну, амплитуда которой в любом направлении с ростом расстояния  $x$  изменяется по закону

$$p(x,t) = 2(U_{01} + U_{03}) \rho_1 c_1 S/x. \quad (15)$$

Распределения (13) и (14) важны с практической точки зрения. Это обусловлено тем, что при проведении акустических измерений, используемые для этой цели микрофоны, всегда ориентируют вдоль центральной оси термофона как это показано, например, на рис. 3, а [6]. Результаты измерений можно сопоставить с расчётыми значениями амплитуды звукового давления, получаемыми из формулы (12).

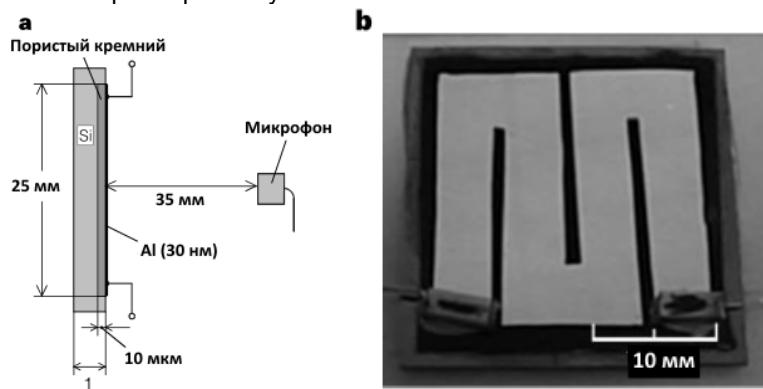


Рис. 3. Термофон H. Shinoda [6]: а – структурная схема; б – вид термофона сверху

### 3. Сопоставление результатов расчётов и акустических измерений

Используем формулы (12), (13) и (14) для оценки величины амплитуды звукового давления реального термофона, технические характеристики которого представлены в статье [6]. Фотография термофона показана на рис. 3, б. Его активный элемент изготовлен из алюминия и имеет: толщину  $h = 30$  нм, длину  $l = 110$  мм, ширину  $b = 4,5$  мм, электрическое сопротивление  $R_e = 22,0$  Ом. Активный элемент сформирован методом напыления на плоской поверхности слоя пористого кремния, имеющего толщину 10,0 мкм.

Измерение амплитуды звукового давления производилось микрофоном, срез приёмной головки которого находился на расстоянии  $x_0 = 35,0$  мм от поверхности термофона. Микрофон ориентирован вдоль центральной оси излучающей поверхности термофона. При проведении измерений удельная мощность тепловыделения активного элемента  $q_e = 1,0$  Вт/см<sup>2</sup> была постоянной. Звуковая волна формировалась в воздухе, находящемся при нормальных условиях.

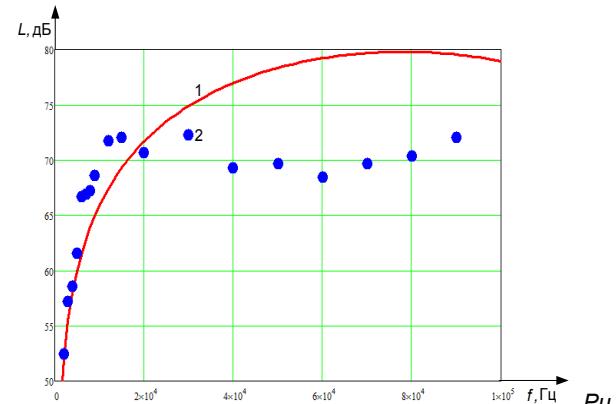
Оценка величины параметров, входящих в выражение (7), даёт  $K_{H1} = 5,7$  Вт/м<sup>2</sup>К<sup>0,5</sup> и  $K_{H3} = 837$  Вт/м<sup>2</sup>К·с<sup>0,5</sup>. Следовательно, в данном термофоне выполняется неравенство  $K_{H1} \ll K_{H3}$ . Для расчёта амплитуды переменной температуры поверхности активного элемента будем использовать выражение (8). Кроме того, мы можем исключить параметр  $K_{H1}$  из формул (9) и (10).

Расчёт параметров термофона, характеризующих его как источник звуковой волны, позволяет получить следующие результаты: радиус эквивалентной круглой площади излучения  $r_0 = 13,0$  мм; амплитуда колебательной скорости в плоскости  $x = \lambda_{T1}$   $U_{01} = 2,0 \cdot 10^{-4}$  м/с; амплитуда колебательной скорости поверхности активного элемента  $U_{03} = 2,4 \cdot 10^{-5}$  м/с. Сопоставление величин  $U_{01}$  и  $U_{03}$  позволяет сделать вывод о том, что колебания поверхности твёрдого тела, вызванные периодическими изменениями её температуры, вносят достаточно весомый вклад в акустическое поле термофона. Из формулы (11) видно, что величину этого вклада можно регулировать за счёт изменения пористости вещества подложки.

Результаты расчёта амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) термофона представлены на рис. 4. Условия расчёта соответствовали схеме акустических измерений, показанной на рис. 3, а. Для расчёта АЧХ использовано выражение (12), в котором было принято фиксированное значение расстояния  $x_0 = 35,0$  мм. На графике (рис. 4) нанесены также экспериментальные точки. Результаты измерений взяты из статьи [6].

Сопоставление результатов расчётов и измерений позволяет сделать следующие выводы. В диапазоне частот от 2,0 до 30,0 кГц данные расчётов и измерений практически совпадают. На частотах, лежащих выше 30,0 кГц, результаты расчётов в среднем на 10,0 дБ превышают экспериментальные значения. Для нахождения причин, объясняющих эти различия, необходимо прове-

сти дополнительные теоретические и экспериментальные исследования. Уровни звукового излучения, создаваемого термофоном в диапазоне частот от 2,0 до 90,0 кГц, достаточны для использования термофонов в качестве источников звука при создании различных технических устройств.



с. 4. Амплитудно-частотная характеристика термофона:

1 – расчётные данные; 2 – эксперимент

### Заключение

Результаты работы могут быть сформулированы следующим образом.

В случае, когда термофон излучает звуковую волну в газообразную среду, при расчёте амплитуды переменной температуры активного элемента и акустических параметров термофона, потерями тепла в газообразную среду можно преебречь.

Применение в качестве подложки пористых материалов увеличивает акустическую эффективность термофонов. Изменение пористости вещества подложки влияет как на её теплофизические параметры, так и на амплитуду механических колебаний свободной поверхности подложки.

При расчётах параметров акустического поля, создаваемого термофоном, необходимо учитывать звуковую волну, возникающую в результате механических колебаний верхней поверхности термофона.

Предложенная в работе методика расчёта акустических параметров термофонов даёт результаты, хорошо совпадающие с экспериментальными данными, полученными другими авторами, на частотах от 2,0 до 30,0 кГц. На частотах выше 30,0 кГц имеется качественное совпадение результатов расчётов и измерений.

Для изготовления элементов термофона можно подобрать вещества, физические характеристики которых стабильны во времени, что позволяет исключить процесс старения его параметров. Кроме того, использование химически чистых веществ для изготовления деталей термофонов позволяет создавать источники звука, стабильно работающие в сильных физических полях различной природы, в том числе в условиях сильного ионизирующего облучения.

**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. P. 22–38.
3. Wente E.C. The Thermophone // Phys. Rev., 1922. P. 333–345.
4. Васильев Б.П., Легуша Ф.Ф., Невеселова К.В. Термоакустические излучатели низкочастотного звука и их применение в акустике // XXVII сессия РАО, посвящённая памяти учёных-акустиков «Крыловского гос. научного центра» А.В. Смольякова и В.И. Попкова. – СПб, 2014.
5. Невеселова К.В. Излучение звука термофоном. // Материалы НПК, посвящённой 150-летию со дня рождения акад. А.Н. Крылова. – СПб.: СПбГМТУ, 2013. 165–168 с.
6. Shinoda H., Nakajima T., Ueno K., Koshida N. Thermally induced ultrasonic emission from porous silicon. Nature (London), Vol 400, 1999. P. 853–855.
7. 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.
8. Ji Won Suk, Kirk K., Hao Y., Hall N.A., Ruoff R.S. Thermoacoustic Sound Generation from Monolayer Graphene for Transparent and Flexible Sound Sources. Adv. Mater. 2012. P. 1–6.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том VI. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. 736 с.
10. Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука.– М.: Изд. МГУ, 1960. 338 с.

**References**

1. Beranek L. Akusticheskie izmereniya. M.: IL, 1952. 626 p.
2. Arnold H.D., Crandall I.B. The Thermophone as a Precision Source of Sound. Phys. Rev., 1917. P. 22–38.
3. Wente E.C. The Thermophone. Phys. Rev., 1922. P. 333–345.
4. Vasil'ev B.P., Legusha F.F., Neveselova K.V. Termoakusticheskie izluchateli nizkochastotnogo zvuka i ikh primenie v akustike. XXVII sessiya RAO, posvyashchennaya pamyati uchenykh-akustikov «Krylovskogo gos. nauchnogo tsentra» A.V. Smol'yakova i V.I. Popkova. – SPb, 2014.
5. Neveselova K.V. Izluchenie zvuka termofonom. Materialy NPK, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhd. akad. A.N. Krylova. SPb.: SPbGMTU, 2013. 165–168 P.
6. Shinoda H., Nakajima T., Ueno K., Koshida N. Thermally induced ultrasonic emission from porous silicon. Nature (London), Vol 400, 1999. P. 853–855.
7. 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.
8. Ji Won Suk, Kirk K., Hao Y., Hall N.A., Ruoff R.S. Thermoacoustic Sound Generation from Monolayer Graphene for Transparent and Flexible Sound Sources. Adv. Mater. 2012. P. 1–6.
9. Landau L.D., Lifshchits E.M. Teoreticheskaya fizika. Tom VI. Gidrodinamika. M.: Nauka, 1986. 736 p.
10. Rzhevkin S.N. Kurs lektsiy po teorii zvuka. M.: Izd. MGU, 1960. 338 p.

УДК 006.90.03

## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ ВИБРАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

**Скориантов Николай Николаевич**, кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры Метрологического обеспечения инновационных технологий  
и промышленной безопасности

Санкт-Петербургский Государственный университет аэрокосмического приборостроения  
Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: metro-guap@yandex.ru

**Мишурा Тамара Прохоровна**, кандидат технических наук, доцент,  
зам. заведующего кафедры Метрологического обеспечения инновационных технологий  
и промышленной безопасности  
Санкт-Петербургский Государственный университет аэрокосмического приборостроения  
Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: metro-guap@yandex.ru

**Парфёнова Виктория Олеговна**, младший научный сотрудник  
ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России  
Московская обл., г. Мытищи, Россия

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрены преимущества вибрационного мониторинга энергетического оборудования. Проиллюстрирован пример планирования текущего ремонта по анализу диагностических признаков с выводом сообщений экспертов системы поддержки принятия решений. Показаны наиболее вероятные диапазоны частот и величины повышения уровней вибрации механизмов при различных эксплуатационных дефектах. Отмечены специальные требования, обусловленные высокими требованиями к боеготовности вооружения и военной технике. Перечислены нормированные метрологические характеристики измерительных каналов для обеспечения требований нормативной документации к системам вибрационного мониторинга образцов вооружения и военной техники. Представлен интерфейс перспективной системы мониторинга технического состояния корабельного роторного оборудования. Сформулирован вывод о целесообразности внедрение систем вибрационного мониторинга с нормированными метрологическими характеристиками измерительных каналов.

**Ключевые слова:** метрологическое обеспечение, измерительный канал, нормируемые метрологические характеристики, вибрационный мониторинг, измерительная система, выявление эксплуатационных дефектов.

## MEASUREMENT ASSURANCE OF VIBRATION MONITORING MEASUREMENT TECHNIQUE

**Skoriantov Nikolay Nikolaevich**, Ph.D., Associate Professor,  
Associate Professor, Department of metrological provision  
of innovative technologies and Safety  
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation  
Sankt-Petersburg, Russia  
E-mail: metro-guap@yandex.ru

**Mishura Tamara Proxorovna**, Ph.D., Associate Professor,  
Deputy. head of the department of metrological provision  
of innovative technologies and Safety  
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation  
Sankt-Petersburg, Russia  
E-mail: metro-guap@yandex.ru

**Parfyonova Victoria Olegovna**, Research Associate  
 FGBI "SSMC" Russian Defense Ministry  
 Moscow region., Mytischi, Russia

## ABSTRACT

The advantages of vibration monitoring of power equipment. Illustrates an example of planning maintenance on the analysis of diagnostic signs with error messages of the expert decision support system. Showing the most probable ranges of frequencies and increase the value of the vibration levels at various operational mechanisms defects. Marked special requirements due to high demands on the combat readiness of weapons and military equipment. Are the normalized metrological characteristics of measuring channels to ensure the requirements of regulatory documents to the systems of monitoring vibration models of military equipment. Interface presents a promising system for monitoring the technical condition of the ship's rotating equipment. Conclusions on the feasibility of the introduction of vibration monitoring systems with normalized metrological characteristics of measuring channels.

**Key words:** metrological support, measurement channel, normalized metrological characteristics, vibration monitoring, measuring system, the identification of operational defects.

Для определения технического состояния узлов и агрегатов роторного оборудования разрабатываются и производятся комплексы и системы контроля, диагностирования и прогнозирования, основанные на обработке сигналов вибрации. Они позволяют осуществлять контроль над техническим состоянием практически любых узлов роторного типа: подшипников качения и скольжения, зубчатых и механических передач, электромагнитных систем машин постоянного и переменного тока, рабочих колес компрессоров, турбин, насосов и вентиляторов, муфтовых соединений.

Вибродиагностика – это метод неразрушающего контроля, основанный на анализе комплекс-

са параметров вибрации для определения состояния оборудования.

Вибродиагностика позволяет выявлять самые разнообразные дефекты оборудования, такие, как дисбаланс, несоосность и непараллельность валов, нежесткость и ослабление опор, обрыв анкерных болтов, нарушение геометрии линии вала, а так же различные дефекты подшипниковых узлов, включая проблемы со смазкой.

На основании полученной информации, можно оптимизировать планирование текущего и капитального ремонта (рис. 1), увеличить межремонтный интервал, уменьшить затраты на закупку запчастей и расходных материалов.

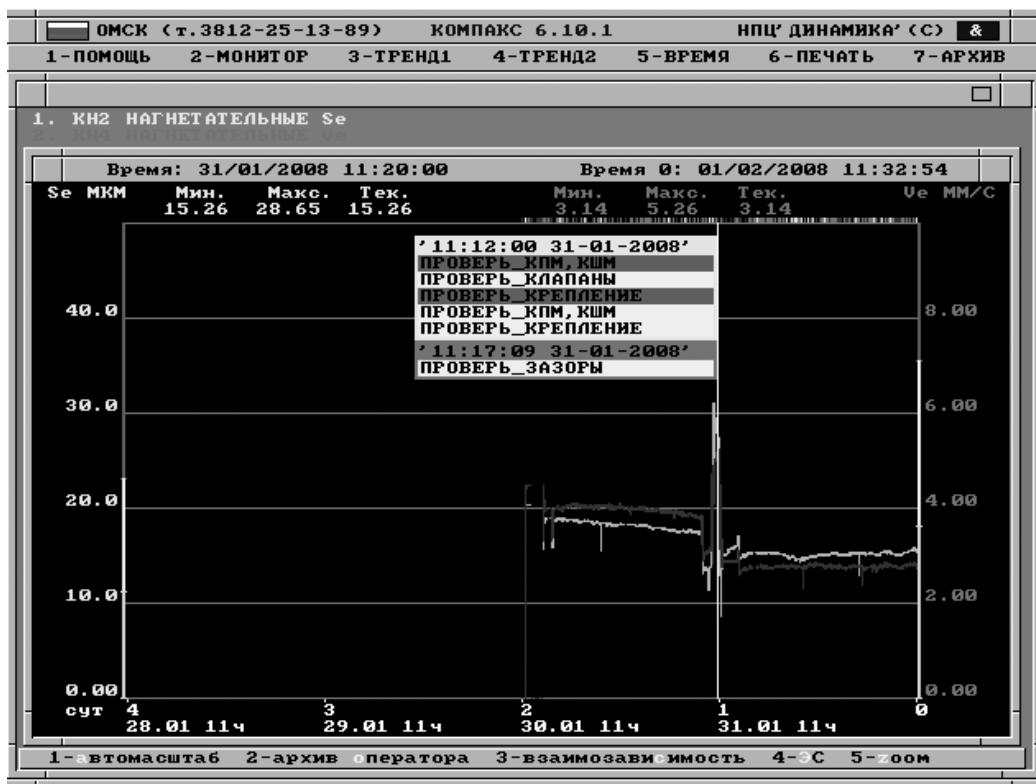


Рис. 1. Пример планирования текущего ремонта по анализу диагностических признаков с выводом сообщений экспертной системы поддержки принятия решений

Вибродиагностическое обследование позволяет:

- комплексно оценивать техническое состояние роторного оборудования;
- выявлять явно выраженные (дисбаланс, расцентровка, недостаточная жесткость опор) и зарождающиеся дефекты оборудования (дефекты подшипников, шестерен и т.п.) (рис. 2);

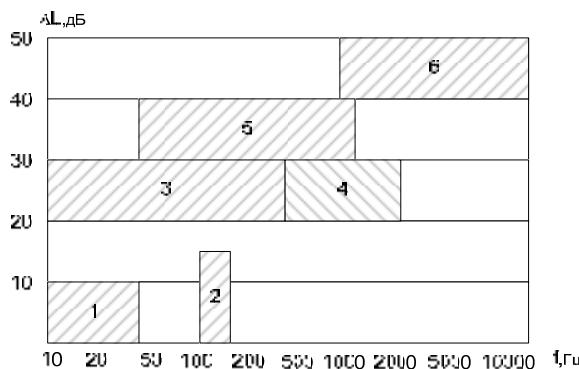


Рис. 2. Диапазоны частот и величины повышения уровней вибрации механизмов при различных эксплуатационных дефектах:

- 1 – дисбаланс ротора; 2 – асимметрия вращающегося магнитного поля; 3 – дефекты насосов и вентиляторов, несоосность валов; 4 – волнистость дорожек подшипника; 5 – разрушение подшипников; 6 – нарушение смазки подшипников, кавитация

- оценивать состояние любых подшипников (качения, скольжения), передаточных механизмов (зубчатых, ременных и цепных) и нагнетающего оборудования (насосы, компрессоры, вентиляторы);
- выявлять дефекты электромагнитных систем электрических машин;
- планировать объемы и сроки ремонтных работ, оценивать качество их выполнения.
- повысить надежность роторного оборудования;
- выявить и предупредить отказы и неисправности;
- определить состояние оборудования;
- оптимизировать планирование текущего и капитального;
- уменьшить затраты на закупку запчастей и расходных материалов.

На рисунке 2 представлены наиболее вероятные диапазоны частот и величины повышения уровней вибрации механизмов при различных эксплуатационных дефектах.

К перспективным системам мониторинга технического состояния предъявляются специальные требования, обусловленные высокими требованиями к боеготовности вооружения и военной технике (ВиВТ), стойкостью к воздействию внешних факторов естественного и искусственно-го происхождения (вибрационная стойкость, воздействие высоких и низких температур, ударостойкость и другие).

Для образцов ВиВТ также устанавливаются нормальные и рабочие условия применения, а также условия транспортирования и хранения.

Чтобы удовлетворять перечисленным выше требованиям, военная измерительная техника должна обладать комплексом свойств, оцениваемых с помощью метрологических, эксплуатационных и других характеристик. Метрологические свойства военной измерительной техники, определяемые ее метрологическими характеристиками, оказывают влияние на погрешность результата измерений, и по ним можно судить о ее пригодности к применению в определенных условиях. Необходимость оценивать погрешности результата измерений по известным свойствам военной измерительной техники привела к тому, что для нее устанавливают комплекс нормируемых метрологических характеристик. К ним относят:

- номинальную характеристику преобразования (для измерительных преобразователей), цену деления шкалы и ее пределы;
- выходной код, число разрядов кода, номинальную цену единицы наименьшего разряда кода (для цифровой измерительной техники);
- систематическую составляющую погрешности;
- случайную составляющую погрешности;
- общую погрешность;
- выходное и входное сопротивления;
- динамические характеристики;
- функции влияния.

В соответствии с ГОСТ Р 8.596-2002 «Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения» измерительная система (ИС) – это совокупность измерительных, связующих, вычислительных компонентов, образующих измерительные каналы, и вспомогательных устройств (компонентов измерительной системы), функционирующих как единое целое, предназначенная для:

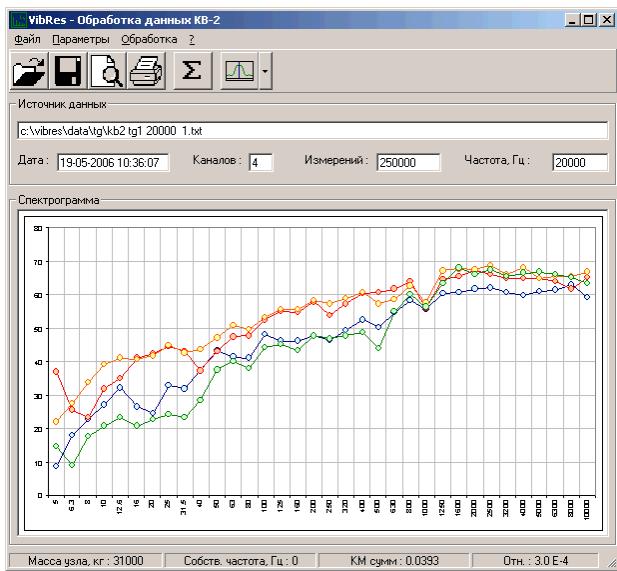
- получения информации о состоянии объекта с помощью измерительных преобразований в общем случае множества изменяющихся во времени и распределенных в пространстве величин, характеризующих это состояние;
- машинной обработки результатов измерений;
- регистрации и индикации результатов измерений и результатов их машинной обработки;
- преобразования этих данных в выходные сигналы системы в разных целях.

ИС являются разновидностью средств измерений и на них распространяются все общие требования к средствам измерений.

На рисунке 3 представлен интерфейс перспективной системы мониторинга технического состояния корабельного роторного оборудования с возможностью установления нормируемых метрологических характеристик измерительных каналов для оценивания погрешности результата измерений измерительной системы.

Для ИС, входящих в состав более сложных структур, следует учитывать требования комплекса стандартов и нормативных документов на автоматизированные системы: ГОСТ 34.201, ГОСТ 34.601, ГОСТ 34.602 и другие документы этого комплекса, а также нормативные документы

и эксплуатационная документация по областям применения этих структур.



*Рис. 3. Интерфейс перспективной системы мониторинга технического состояния корабельного роторного оборудования*

Метрологическое обеспечение ИС включает в себя следующие виды деятельности:

- нормирование, расчет метрологических характеристик измерительных каналов ИС;
- метрологическая экспертиза технической документации на ИС;
- испытания ИС с целью утверждения типа; утверждение типа ИС и испытания на соответствие утвержденному типу;
- сертификация ИС;
- поверка и калибровка ИС;
- метрологический надзор за выпуском, монтажом, наладкой, состоянием и применением ИС.

Нормирование метрологических характеристик ИС является одним из основных элементов системы метрологического обеспечения на этапе проектирования.

Метрологические характеристики ИС нормируют для каждого измерительного канала ИС и при необходимости для комплексных и измерительных компонентов ИС.

Для измерительных каналов ИС (в том числе для измерительных каналов различных типов ИС

или более сложных структур, для которых утверждён тип такого измерительного канала без указания наименования конкретной ИС) изготовитель, как правило, устанавливает нормы на метрологические характеристики измерительных каналов в целом в соответствии с ГОСТ 8.009-84 «Нормируемые метрологические характеристики средств измерений» и с учетом МИ 2439-97.

Нормированные метрологические характеристики измерительных каналов должны обеспечивать:

- расчет характеристик погрешности измерений, выполняемых посредством измерительного канала в рабочих условиях эксплуатации;
- контроль при испытаниях и поверке ИС на соответствие нормированным метрологическим характеристикам измерительного канала ИС.

Реализация мониторинга диагностического параметра с нормированными метрологическими характеристиками измерительных каналов в отношении роторного энергетического оборудования позволяет с высокой степенью достоверности определить его остаточный ресурс и срок службы и, либо рекомендовать провести очередную кампанию энергетических установок без каких-либо существенных операций восстановительного характера, либо провести необходимые техническое обслуживание и ремонт.

В заключение следует отметить, что без системы метрологического обеспечения, которая позволяла бы определять метрологические характеристики первичных преобразователей (датчиков вибрации, импедансных головок и т.п.) при выпуске из производства и в эксплуатации, невозможно решать вопросы достоверности получаемых результатов при прогнозировании отказов работающих машин и механизмов на основании анализа механической энергии, которая распространяется от работающего механизма по присоединенным конструкциям объектов, в том числе и в окружающее пространство.

Внедрение системы вибрационного мониторинга с нормированными метрологическими характеристиками измерительных каналов позволило сократить расходы на ремонт энерготехники примерно в два раза при одновременном увеличении межремонтного периода эксплуатации на 25 %.

## Литература

1. ГОСТ 20911-89. «Техническая диагностика. Основные термины и определения».
2. ГОСТ 8.009-84 «Нормируемые метрологические характеристики средств измерений».
3. Дюдин Е.С., Кавецкий Н.А. Метрологическая экспертиза вооружения, военной и специальной техники ВМФ: Учеб. пособ. для метрологов предприятий и организаций судостроения. 2012. 150 с.
4. Скориантов Н.Н., Гетьман Р.В. Аспекты создания системы метрологического обеспечения измерительных систем при оценке технического состояния оборудования энергетических установок // Межотраслевая научно-практическая конференция "Военное кораблестроение – 2012". Материалы конференции. СПб., 2012.

**References**

1. GOST 20911-89. «Tekhnicheskaya diagnostika. Osnovnye terminy i opredeleniya».
2. GOST 8.009-84 «Normiruemye metrologicheskie kharakteristiki sredstv izmereniy».
3. *Dyudin E.S., Kavetskiy N.A. Metrologicheskaya ekspertiza vooruzheniya, voennoy i spe-tsial'noy tekhniki VMF. Uchebnoe posobie dlya metrologov predpriyatiy i organizatsiy sudo-stroeniya*, 2012, 150 s.
4. *Skoriantov N.N., Get'man R.V. Aspekty sozdaniya sistemy metrologicheskogo obespe-cheniya izmeritel'nykh sistem pri otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya energeticheskikh ustanovok. Mezhotraslevaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Voennoe korablestroenie – 2012". Materialy konferentsii*, SPb., 2012.

## **Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ**

УДК 532.526

### **ВЫЧИСЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛА МИТЧЕЛА ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ОДНОКОРПУСНОГО СУДНА МЕТОДОМ КОНЕЧНОГО КОРНЯ**

**Камил М. С.**, аспирант,

Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
Санкт-Петербург, Россия

Малайзийский институт морского инжиниринга университета Куала-Лумпур  
Лумут, Перак, Малайзия  
E-mail: mdsalim@unikl.edu.my

#### **АННОТАЦИЯ**

Известно, что волновые интегралы линейной теории однокорпусных судов Митчела (1898) и Ньюмена (1977), обобщенные на случай многокорпусных судов Таком и Лазаускасом (1998), включают высокочастотные осциллирующие функции и представляют большие трудности при проведении вычислений. В работах Виглея (1942) приведены результаты обширного теоретического исследования и экспериментальной апробации «волнового» интеграла Митчела. На первый взгляд, формулы для вычисления волнового сопротивления в работах Митчела и Ньюмена аналогичны. Однако, при более подробном рассмотрении выясняется, что в них используются различные функции волновой амплитуды. Заметим, что упомянутые интегралы содержат тригонометрическую функцию  $\sec \theta$  и ее степени и при их вычислении в заданных пределах  $-\pi/2$  and  $\pi/2$  оказываются расходящимися. Исключая сингулярные пределы посредством перехода к интегрированию от  $-\pi/2 + \varepsilon$  до  $\pi/2 - \varepsilon$  (где  $\varepsilon \ll 1$ ), можно получить конечное значение обсуждаемых интегралов, однако, как показали расчеты различных авторов, результаты существенно зависят от величины  $\varepsilon$ . В частности, значительные погрешности расчета получаются при параболической аппроксимации ватерлинии, применяемой в модели Виглея, особенно в диапазоне более высоких значений числа Фруда. С целью достижения однозначных результатов расчетов интеграла Митчела, содержащего сильно осциллирующие функции, автором настоящей статьи разработан так называемый метод «конечного корня». Этот новый метод позволяет обеспечить устойчивый расчет «волнового» интеграла и получить теоретические данные, хорошо согласующиеся с экспериментом и расчетными результатами других авторов, полученными иными методами. Метод дает возможность с большой точностью найти «конечный» (наиболее близкий к  $\pi/2$ ) корень подынтегральной функции, соответствующий предельному углу фронта распространения волн используемый в качестве верхнего (а со знаком минус и нижнего) предела интегрирования. Результаты, полученные методом «конечного» корня апробированы путем сравнения с теорией Виглея параболического судна, данными Национальной физической лаборатории по корпусам с закругленными скулами, а также другими теориями и экспериментом. Этот метод показал себя как наиболее устойчивый и точный, а также наилучшим образом соглашающийся с экспериментом и поэтому он представляется полезным как инженерный метод оценки волнового сопротивления в составе полного сопротивления судна для оценки его ходкости в проектном синтезе.

**Ключевые слова:** линейная теория тонкого судна, волновое сопротивление судна, вычисление интегралов от сильно осциллирующих функций.

### **SOLVING MICHELL SHIP WAVE RESISTANCE INTEGRAL OF MONO-HULL SHIPS BY FINAL ROOT METHOD**

**Kamil M. S.**, PhD Candidate

Saint Petersburg State Marine Technical University  
Sankt-Petersburg, Russia

Universiti Kuala Lumpur Malaysian Institute of Marine Engineering Technology  
Lumut, Perak, Malaysia  
E-mail: mdsalim@unikl.edu.my

## ABSTRACTS

It is known that the ship wave resistance integral of the linear thin ship theory of mono-hull ships by Michell (1898) and Newman (1977) are high-oscillating functions and present great difficulties in performing calculations. Wigley (1942) improvised the Michell integral and had carried out extensive theoretical studies on the Michell ship "wave" resistance integral and performed validation by model experiments. At first glance, the integral functions for the ship wave resistance by Michell and Newman are similar. However, on closer examination it turns out that they use different wave amplitude functions. It is noted that these integrals contain trigonometric function of  $\sec\theta$  and its power, and when they are calculated in the prescribed limits of  $-\pi/2$  and  $\pi/2$  the results are divergent (infinity). Excluding the singular limits by switching to integration from  $-\pi/2 + \varepsilon$  to  $\pi/2 - \varepsilon$  (where  $\varepsilon \ll 1$ ), we can obtain the final value of the said integrals, however, as shown by the calculations of different authors, the results depend strongly on the value of  $\varepsilon$ . In particular, significant errors could occur if direct integration of the wave amplitude functions is done and used in the calculation of the resistance integrals or calculation of the parabolic approximation of the waterline used in Wigley model, particularly in a range of higher values of the Froude number. In order to achieve consistent results of calculation of the Michell and Newman integrals which are highly oscillating functions, the present author developed a method called "Final Root." This new method produces a stable solution of the theoretical ship "wave" resistance integral and the results obtained are indeed in good agreement with the experimental results and the calculated results of other authors obtained by different methods. The method makes it possible to accurately determine the "final" (closest to) root of the primary integrand corresponding to the limiting wave propagation angle of the wave system in which this angle is used as the upper (a minus sign and lower) limit of the mathematical integration. The results obtained by the "final or last" root are calculated utilising a real ship hull form and Wigley parabolic hulls. The results are validated against results obtained from experiments and calculation done by other authors based on other theories and methods. The final root method has been shown to be the most stable and accurate, matched very much closer with the experimental results than the results obtained by other theoretical methods and therefore the final root method could be very useful as an engineering method for estimating the wave resistance component and hence the total resistance for purpose of ship powering estimate in the design synthesis.

**Key words:** linear thin ship theory, ship wave resistance, highly oscillatory integral functions, final root.

## Введение

В основу предпринятого исследования положена линейная теория тонкого судна Митчела (1898) и работы его последователей по дальнейшему развитию этой теории. В качестве основных инструментов расчета волнового сопротивления в рамках линейной теории рассмотрены: формула Митчела определения волнового сопротивления широко известная как интеграл Митчела, ее обобщение Виглеем (1942), названное в данной работе интегралом Митчела-Виглея, а также формула для определения волнового сопротивления, полученная Ньюменом (1977).

Митчел нашел потенциал скорости задачи посредством интегральной теоремы Фурье. Он нашел формулу для вычисления волнового сопротивления тонкого судна, движущегося по поверхности идеальной тяжелой жидкости бесконечной глубины и определил связь волнового сопротивления с формой корпуса судна. По Митчелу волновое сопротивление судна может быть найдено путем интегрирования распределения давлений по корпусу судна в продольном направлении с подстановкой производных потенциала скорости в следующем общем виде

$$R_w = -2\rho U \iint (d\phi/dx)(d\eta/dx) dx dz \quad (1)$$

Ньюмен вывел интеграл волнового сопротивления связав значение сопротивления в общем,

пространственном случае с импульсом энергии следа вниз по потоку и использовал приближенный метод стационарной фазы для нахождения функции волновой амплитуды. В достаточно общем случае формула Ньюмена волнового сопротивления имеет следующий вид

$$R_w = (4\rho g^2/\pi U^2) \int |(I^2 + J^2)| \sec^3 \theta d\theta; 0 \leq \theta \leq \pi/2 \quad (2)$$

В своем исследовании Ньюмен заключил, что при постоянной плотности воды величина волнового сопротивления пропорциональна квадрату скорости судна ( $U^2$ ) и взвешенному интегралу от квадрата волновой амплитуды ( $|A(\theta)|^2$ ) с учетом пропорциональности подынтегральной функции кубу косинуса угла распространения волн ( $\cos^3 \theta$ ). Интересно, что выкладки Ньюмена приводят к формуле волнового сопротивления Митчела, хотя в деталях имеется отличие в части используемых функций волновой амплитуды.

## 1. Постановка задачи

### 1.1. Основная формула для однокорпусных судов

Формула Митчела (1898), преобразованная Виглеем (1942) для определения волнового сопротивления однокорпусного судна имеет вид:

$$R_w = (4\rho g^2/\pi U^2) \int |(I_2 + J_2)| \sec 3\theta d\theta; 0 \leq \theta \leq \pi/2 \quad (3)$$

$$J = bd \iint (\partial\eta/\partial\xi) \exp(dg\zeta \sec 2\theta/U^2) \sin(lg\xi \sec\theta/U^2) \delta\xi \delta\zeta; -1 \leq \xi \leq 1, 0 \leq \zeta \leq 1 \quad (4)$$

$$I = bd \iint (\partial\eta/\partial\xi) \exp(dg\zeta \sec 2\theta/U^2) \cos(lg\xi \sec\theta/U^2) \delta\xi \delta\zeta; -1 \leq \xi \leq 1, 0 \leq \zeta \leq 1 \quad (5)$$

Где;

$b$  – максимальная полуширина ( $B/2$ ),  
 $l$  – половина длины ( $L/2$ ),  $d$  – осадка,  $\xi = x/l$ ,  
 $\eta = y/b$ ,  $\zeta = z/d$ ,  $\eta_x = \partial\eta/\partial\xi$ ,

$x$  – осевое положение вдоль длины судна, отсчитываемое от мидель-шпангоута,

$y$  – ордината точки поверхности корпуса, отсчитываемая от диаметральной плоскости судна,  $\eta = f(\xi, \zeta)$  уравнение половины поверхности корпуса

Преобразованный таким образом Виглеем Интеграл Митчела в дальнейшем будет называться волновым интегралом Митчела-Виглея в честь обоих авторов, но в особенности в честь Митчела в связи с его пионерским исследованием теоретического решения задач определения волнового сопротивления в рамках линейной теории. Формула Ньютона для определения волнового сопротивления имеет вид:

$$R_w = (\pi\rho U^2/2) \int |A(\theta)|^2 \cos^3 \theta d\theta; -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2 \quad (6)$$

$$A(\theta) = (2v/\pi) \sec^3 \theta \iint \eta_x \exp(v \sec^2 \theta z) \cos(v \sec \theta x) dz dx; d \leq z \leq 0, -L/2 \leq x \leq L/2, v = g/U^2 \quad (7)$$

С учетом выражения Митчела-Виглея для функции волновой амплитуды тонкого судна имеем:

$$\iint (\partial\eta/\partial x) \exp[u \sec^2 \theta(z + ix \cos \theta)] dz dx = I_{CP}, \quad (8)$$

Отсюда  $A(\theta)_{CP} = (2u/\pi) \sec^3 \theta I_{CP}$ .  $A(\theta)_{CP}$  есть функция волновой амплитуды в диаметральной плоскости судового корпуса, причем нижний индекс  $CP$  относится к диаметральной плоскости, а волновое число  $u = g/U^2$ .

Гипотетически величина волнового сопротивления движущегося в воде судна также зависит от точного значения максимального угла распространения комбинированных расходящихся иоперечных волн. Этот угол, определяющий максимальный верхний предел в интеграле волнового сопротивления включающем функции волновой амплитуды должен заменить максимальный предел интегрирования  $\pi/2$ , фигурирующий в оригинальных выражениях Ньютона и Митчела-Виглея, в которых для конкретной скорости судна угол может быть определен путем нахождения корня в исходной волновой функции. Это единственное значение угла названо точным значением максимального результирующего угла распространения волн и обозначено  $\theta_{pmax}$ . В случае катамарана, так же как и для однокорпусных судов существует определенная осредненная волновая функция непосредственно связанная с первичной

системой волн, генерируемых движущимся катамараном.

Математически, подынтегральная функция входящая в  $R_w$  содержит бесконечное число корней. В связи с высокочастотными осцилляциями задача определения корней является весьма сложной. Тем не менее, практически, корни могут быть определены итеративно, а их положение – проиллюстрировано графически посредством построения подынтегральной функции в зависимости от угла распространения волн  $\theta$ , то есть  $fR_w$  от  $\theta$ .  $fR_w$  представляет собой функцию интеграла волнового сопротивления. Положения бесконечных корней предполагаются в точках перегиба, в которых кривизна кривых меняет знак с положительного на отрицательный для точек максимума (от +ve к -ve) или от с отрицательного на положительный для точек минимума (от -ve к +ve), то есть корни будут представлять собой значения  $\theta$  обращающие  $dfR_w/d\theta$  в нуль. В исследовании основное внимание уделялось конечному корню, который в общем случае существует на множестве точек минимума в окрестности значений  $\theta$  близких к  $\pi/2$ . Так называемый точный максимальный результирующий угол распространения волн  $\theta_{pmax}$  и представляет собой конечный корень подынтегральной функции волнового интеграла, соответствующий точке минимума кривой  $fR_w$ . За этой точкой вполне определенно не существует корней соответствующих минимуму. Можно получить формы так называемой первичной системы волн и построить эти кривые с целью доказательства существования  $\theta_{pmax}$  и первичных или осредненных подынтегральных функций волнового интеграла. Эти функции формы получены путем расчета волнового интеграла судна на подходящем интервале  $\theta$  и должны соответствовать условию о том, что результирующая величина интегральной функции при переходе  $\theta$  через значение  $\theta_{pmax}$  возрастает и стремится к бесконечности. При  $\theta_{pmax}$  достигается действительное значение волнового сопротивления судна и поэтому волновой интеграл как для случая однокорпусного, так и для случая двухкорпусного судна вычисляется вплоть до максимального значения  $\theta_{pmax}$ . Такая методология является новым подходом в теории сильно осциллирующих волновых функций, позволяет вычислить волновое сопротивление однокорпусного и двухкорпусного судна и названа «методом конечного корня».

## 1.2. Модифицированный волновой интеграл

Однокорпусное судно. Таким образом модифицированное выражение для волнового сопротивления однокорпусного судна с учетом значения верхнего предела  $\theta_{pmax}$  и выражениями для  $J$  и  $I$  в их исходном виде следующим образом

$$R_w = (4\rho g^2/\pi U^2) \int (I^2 + J^2) \sec^3 \theta d\theta; 0 \leq \theta \leq \theta_{pmax} \quad (9)$$

$$J = bd \iint (\delta\eta/\delta\xi) \exp(-dg\zeta \sec^2\theta/U^2) \sin(lg\xi \sec\theta/U^2) \delta\xi \delta\zeta; -1 \leq \xi \leq 1, 0 \leq \zeta \leq 1 \quad (10)$$

$$I = bd \iint (\delta\eta/\delta\xi) \exp(-dg\zeta \sec^2\theta/U^2) \cos(lg\xi \sec\theta/U^2) \delta\xi \delta\zeta; -1 \leq \xi \leq 1, 0 \leq \zeta \leq 1 \quad (11)$$

## 2. Метод расчета

### 2.1. Метод интегрирования

Результаты применения предложенного метода для однокорпусного судна для корпусов с различными главными размерениями при соответствующей разбивке по длине судна и по вертикали от свободной поверхности до киля по первому и второму правилу Симпсона приведены ниже.

Интегрирование с целью вычисления интегралов I и J производится сначала по направлению  $\eta - \zeta$  в каждом поперечном сечении судна, а затем в направлении  $\xi$  по всей длине судна. Системы координат для случая однокорпусного показаны на Рис. 1. Затем интегрирование продолжается по угловой переменной  $\theta$  от нуля до конечного результирующего значения угла распространения волн  $\theta_{\text{ртм}}$ , что позволяет получить волновое сопротивление  $R_w$ . Интегрирование по углу  $\theta$  производится с основным шагом в один градус и более мелким шагом вблизи конечного значения  $\theta_{\text{ртм}}$ .

Основные размерения модели LCS:

Длина по ватерлинии, LWL	- 6.831 м
Draft, T	- 0.289 м
Ширина по ватерлинии, BWL	- 0.975 м
Площадь смоченной поверхности S при осадке T	- 7.747 м <sup>2</sup>

Основные размерения модели судна Виглея (корпус 1):

Длина по ватерлинии, LWL	- 1.8 м
Осадка, T	- 0.113 м
Ширина по ватерлинии, BWL	- 0.180 м
Площадь смоченной поверхности, S при осадке T	- 0.482 м <sup>2</sup>

Основные размерения модели судна Виглея (корпус 2):

Длина по ватерлинии, LWL	- 3.048 м
Осадка, T	- 0.191 м
Ширина по ватерлинии, BWL	- 0.305 м
Площадь смоченной поверхности, S при осадке T	- 1.381 м <sup>2</sup>

### 3. Экспериментальный и теоретический анализ коэффициентов волнового сопротивления для однокорпусного судна

#### 3.1. Экспериментальный анализ

Экспериментальный анализ волнового сопротивления для судна реальных обводов и корпуса 1 Виглея выполнен с учетом процедур, предложенных ITTC 1957:

$$\begin{aligned} R_T &= R_F + R_R \\ C_T &= C_F + C_R = R_T / (\frac{1}{2}\rho U^2 S) \\ C_R &= R_R / (\frac{1}{2}\rho U^2 S) \\ C_F &= 0.075 / (\log R_n - 2)^2 \end{aligned} \quad (12)$$

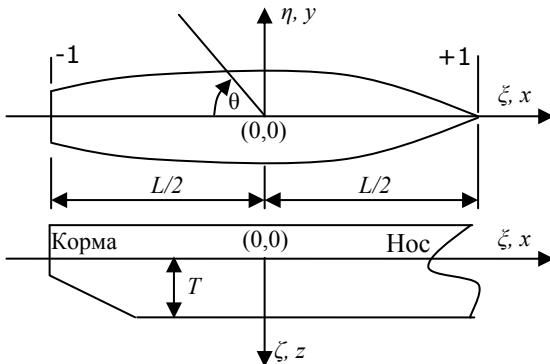


Рис. 1. Конфигурация однокорпусного судна и система координат

Экспериментальные значения волнового сопротивления  $R_w$  вычитались из полного сопротивления, полученного из модельных экспериментов с учетом фактора  $(1+k)$  по методу Проказки (1966). Значения величин  $C_T/C_{F_0}$  и  $F_n^4/C_{F_0}$  во всем экспериментальном диапазоне чисел Фруда и приведены на Рис. 2 для корпуса LCS и для корпуса 1 Виглея. Кривая плавно продолжается до пересечения оси  $y$  ( $C_T/C_{F_0}$ ) и фактор  $(1+k)$  представляет собой значение  $C_T/C_{F_0}$  при  $F_n^4/C_{F_0} = 0$ .

$$\begin{aligned} C_T &= C_V + C_W; C_V = (1+k)C_{F_0} \\ C_V &= (1+k)C_{F_0}; C_{F_0} = C_F \\ C_W &= C_T - C_V = C_T - (1+k)C_{F_0} \\ R_w &= \frac{1}{2}\rho C_W S U^2 \end{aligned} \quad (13)$$

#### 3.2. Теоретический анализ

Теоретический анализ волнового сопротивления судна и его коэффициентов методом конечного корня выполнен и апробирован экспериментально для следующих случаев:

Случай 1 – Сравнение результатов метода конечного корня (Модифицированный метод Митчела-Виглея) с экспериментом для реального корпуса LCS

Случай 2 – Сравнение результатов модифицированного метода Ньюмена для реального корпуса LCS с экспериментом

Случай 3 – Сравнение метода конечного корня (модифицированный метод Ньюмена для корпуса 1 Виглея) с экспериментом

Случай 4 – Сравнение метода конечного корня (модифицированный метод Митчела-Виглея для корпуса 1 Виглея) с экспериментом

Случай 5 – Сравнение метода конечного корня (модифицированный метод Ньюмена для корпуса 1 Виглея) с экспериментами и метода Ньюмена непосредственного интегрирования

Случай 6 – Сравнение (модифицированный метод Ньюмена для корпуса 1 Виглея) с экспери-

ментами и методом Митчела-Виглея при непосредственном вычислении интеграла  $J$

Случай 7 – Сравнение метода конечного корня (Модифицированный метод Митчела-Виглея для корпуса 2 Виглея) с экспериментами по измерению волнового профиля и расчетами методами вычислительной гидродинамики CFD

Теоретический анализ перечисленных семи случаев произведен на основе модифицированных формул Митчела-Виглея и Ньюмена вычисления волнового сопротивления с применением описанной выше технологии вычислений.

### 3.3. Результаты экспериментального и теоретического анализа для однокорпусного судна

Экспериментальные и теоретические результаты для однокорпусного судна для различных случаев приведены в таблицах 1–7 и на рис. 2–7.

Таблица 1

#### Экспериментальные и теоретические значения $C_w$ (Корпус 1 Виглея – Случаи 3 и 4)

$F_n$	$C_w \times 10^3$ Эксп	$C_w \times 10^3$ Метод ко- нечного корня (Модиф. Ньюмен )	$C_w \times 10^3$ Метод конеч- ного корня (Модиф. Мит- чел-Виглей)
0.30	0.870	0.845	0.833
0.40	2.681	2.599	2.570
0.50	3.951	3.824	3.760
0.60	4.637	4.471	4.403
0.70	4.609	4.435	4.371
0.80	4.485	4.296	4.249
0.90	4.345	4.160	4.108
1.00	4.278	4.056	4.012

Таблица 2

#### Экспериментальные и теоретические значения $C_w$ (МКК, LCS – Случаи 1 и 2)

$F_n$	$C_w \times 10^3$ Эксп	$C_w \times 10^3$ Мит- чел Виглей - Прямая инте- грация $J$ инте- грантам	$C_w \times 10^3$ (Ньюмен - Прямая ин- теграция $J$ интегрантом)
0.30	0.870	2.980	1.176
0.40	2.681	4.393	2.548
0.50	3.951	5.527	3.740
0.60	4.637	6.453	4.793
0.70	4.609	7.230	5.723
0.80	4.485	7.897	6.512
0.90	4.345	8.479	7.218
1.00	4.278	8.996	7.824

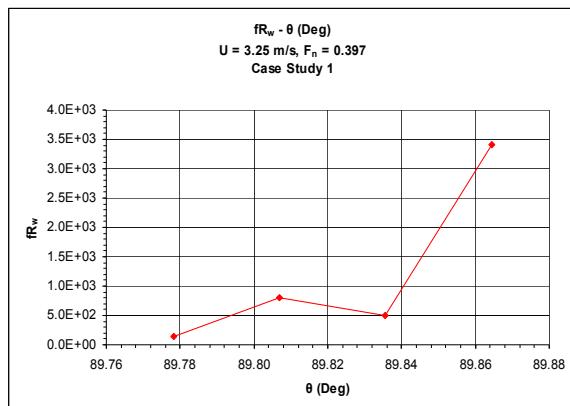


Рис. 2. Характерная функция формы интеграла  $fR_w$   
(Случай 1, однокорпусное судно LCS,  $F_n = 0.397$ )

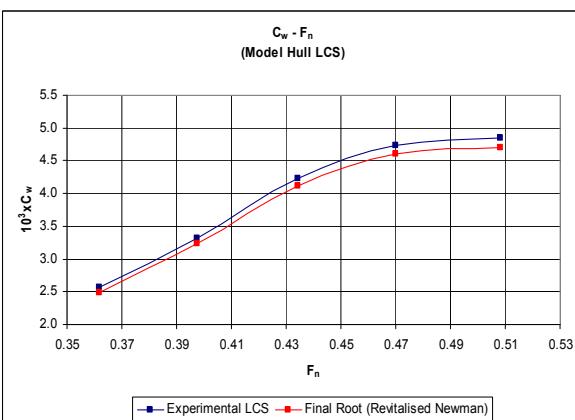


Рис. 3. Графики экспериментальных и теоретических значений  $C_w$  по числу  $F_n$   
(Метод конечного корня, модифицированный интеграл Ньюмена, LCS – Случай 2)

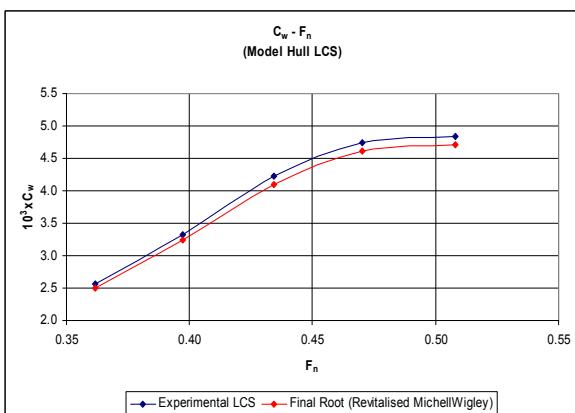


Рис. 4. Графики экспериментальных и теоретических значений  $C_w$  от числа  $F_n$  (Метод конечного корня, Интеграл Митчела-Виглея для LCS – Случай 1)

Таблица 3  
SangsonJu (эксперимент) и МКК (теория)  
Случаи 7a и 7b

$F_n$	$C_w \times 10^3$ сангсонжу (эксп)	$C_w \times 10^3$ , МКК (Модиф. Митчел-Виглей)
0.22	0.460	0.446
0.25	0.790	0.762
0.27	0.780	0.748
0.28	0.940	0.896
0.32	1.470	1.428
0.34	1.410	1.383
0.37	1.520	1.490
0.40	2.120	2.073

Таблица 4  
Экспериментальные и теоретические значения  $C_w$   
(Непосредственное вычисление интегралов I и J  
для корпуса 1 Виглея – Случаи 5 и 6)

$F_n$	$C_w \times 10^3$ Эксп (LCS)	$C_w \times 10^3$ МКК (Мит- чел-Виглей )	$C_w \times 10^3$ МКК (Ньюмен)
0.362	2.565	2.494	2.495
0.397	3.323	3.246	3.233
0.434	4.222	4.097	4.123
0.470	4.738	4.619	4.604
0.508	4.842	4.709	4.697

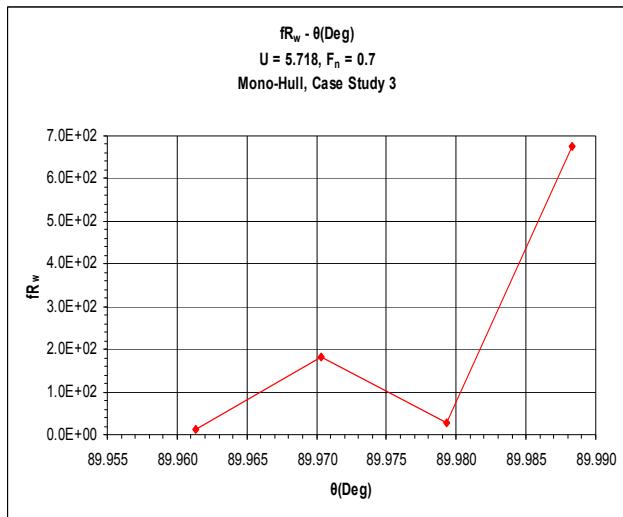


Рис. 5. Характерная функция формы интеграла  $fR_w$   
(Случай 3, однокорпусное судно, корпус 1 Виглея,  
 $F_n = 0.7$ )

Таблица 5  
Сонг-Баддур CFD (Доусон и Ньюмен кельвин) –  
Случаи 7с и 7d

$F_n$	Сонг & Баддур	
	$C_w \times 10^3$ (CFD Доусон)	$C_w \times 10^3$ (CFD Ньюмен Кель- вин)
0.23	0.611	0.528
0.25	0.722	0.778
0.27	0.722	0.778
0.28	0.889	0.833
0.31	1.361	1.333
0.32	1.333	1.306
0.34	1.167	1.167
0.35	1.111	1.111
0.37	1.167	1.167
0.40	1.667	1.611

Таблица 6  
Расчет Сангсон Джу по волновому профилю,  
эксперимент, случай 7е

$F_n$	$C_w \times 10^3$ Расчет Сангсон Джу по волновому профилю (эксперимент)	
	$C_w \times 10^3$ (эксперимент)	$C_w \times 10^3$ (CFD Доусон)
0.23	0.45	
0.25	0.70	
0.27	0.65	
0.29	1.00	
0.30	1.20	
0.32	1.50	
0.33	1.35	
0.35	1.20	
0.38	1.40	
0.40	1.65	

Таблица 7  
Лалли, Кампана и Булгарелли CFD (Доусон и  
Ньюмен - Кельвин) Случаи 7f, 7g и 7h

$F_n$	2400 панели на СП и 800 панелей на корпусе		
	$C_w \times 10^3$ CFD (Доусон)	$C_w \times 10^3$ CFD (Доусон)	$C_w \times 10^3$ CFD (Ньюмен Кельвин)
0.24	0.950	0.800	0.950
0.25	0.925	0.825	0.900
0.27	0.850	0.950	0.850
0.28	1.050	1.100	1.050
0.31	1.550	1.600	1.400
0.32	1.500	1.650	1.350
0.34	1.300	1.450	1.200
0.35	1.250	1.400	1.200
0.37	1.400	1.500	1.350
0.40	1.900	2.100	1.850

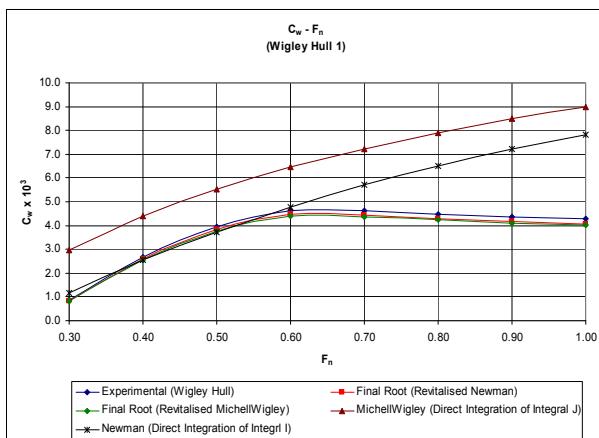


Рис. 6. Графики экспериментальных теоретических значений  $C_w$  по числу  $F_n$   
(Случаи 3, 4, 5 and 6 – Корпус 1 Виглея)

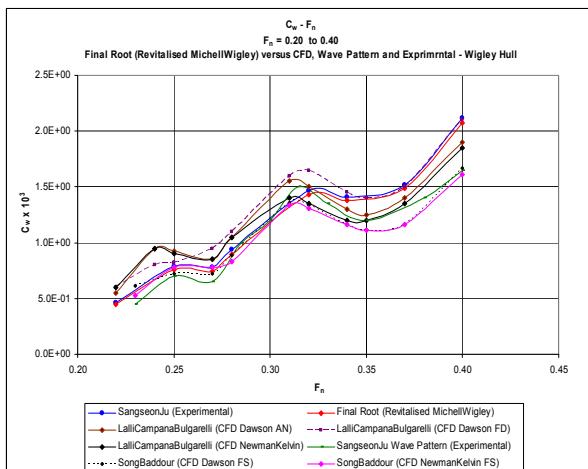


Рис. 7. Графики экспериментальных и теоретических значений  $C_w$  по числу  $F_n$   
(Случай 7 – Корпус 2 Виглея)

### Заключение

Результаты сравнения теоретических и экспериментальных данных и данных других авторов,

### Литература

1. Michell J.H. Wave-Resistance of a Ship, Philosophical Magazine, 1898, Vol. 45, Ser.5, pp106–123.
2. Wigley W.C.S. (1942), Calculated and Measured Wave Resistances for a Series of Forms Defined Algebraically, the Prismatic Coefficient and Angle of Entrance Being Varied Independently, Trans. INA, Vol. 84.
3. Wigley W.C.S. and Lunde J.K. (1948), Calculated and Observed Wave Resistances for a Series of Forms of Fuller Midsections, Trans. INA, Vol. 90.
4. Newman J.N. Marine Hydrodynamics, the MIT Press, 1977, pp. 260–284.
5. Lewis E.V. Principles of Naval Architecture, Volume II, Second Edition, 1988, Resistance, SNAME, pp. 54–62.
6. Kamil M.S., Abdul Ghani M.P., Abdul Malik A.M., Rozhdestvenskiy K.V. An Accurate Ship Wave Resistance of an Improved Michell-Wigley Equation, International Conference on Engineering Technology 2011 (ICET 2011), Kuala Lumpur, 6–8 December 2011.
7. Ship Wave Resistance, A Comparison of Mathematical Theory with Experimental Results, W.C.S Wigley, 67<sup>th</sup>-Session of the Spring Meetings INA, 1926.
8. Wave Resistance Formula of JH Michell's and its Significance in Ship Hydrodynamics, E.O. Tuck, J. Austral. Math. Soc. Ser. B 30, 1989, pp. 365–377.
9. Study of Michell's Integral and Influence of Viscosity and Ship Hull Form on Wave Resistance, A. Sh. Gotman, Oceanic Engineering International, Volume 6, No. 2, 2002, pp. 74–115.

приведенные для случая 7 свидетельствуют об эффективности метода конечного корня в сочетании с принятой технологией вычислений. Существование конечных корней  $\theta_{\max}$  доказано математически и иллюстрируется характерными функциями формы волнового интеграла на Рис. 6 и 7.

В заключение отметим, что использованный в данном исследовании «метод конечного корня-МКК» получил успешную экспериментальную апробацию и удовлетворительно согласуется с данными работ других авторов, в том числе полученными посредством измерения профиля волны, а также методами вычислительной гидродинамики (CFD) как показано на Рис. 9. Метод решения задачи и примененная технология вычислений оказываются весьма полезными с точки зрения применения для высокочастотных волновых интегралов, используемых при вычислении волнового сопротивления однокорпусного судна. Представляется, что предложенный метод предлагает новый альтернативный инструмент в арсенале методов оценки волнового сопротивления судна.

### Благодарности

Автор выражает благодарность профессору К.В. Рождественскому за ценные замечания и рекомендации по выполнению данной работы.

Автор высоко ценит вклад Центра морских технологий Малайзийского университета технологий (MTC-UTM, Malaysia), любезно предоставившего экспериментальные данные, которые автор использовал для апробации своих теоретических исследований.

Автор также благодарит опытный исследовательский центр HSVA (Гамбург, Германия), Королевский флот Малайзии и судостроительный завод Boustead Naval Shipyard Sendirian Berhad за разрешение использовать экспериментальные данные по кораблю прибрежной зоны (LCS).

10. Computation of Nonlinear Ship Waves, S.W. Song, and R.E. Baddour, International Journal for Numerical Methods in Fluids, November 1989.
11. Ship Wave Resistance, Wigley C, Trans. NECI, Volume 47, 1931.
12. Study of Total and Viscous Resistance for the Wigley Parabolic Ship Form, Sangseon Ju, IIHR Report No. 261, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, April 1983.
13. A Three-Dimensional Linear Analysis of Steady Ship Motion in Deep Water, Job Johannes Maria Baar, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Brunel University, Uxbridge, United Kingdom, November 1986.
14. *Campagna E., Lalli F., Bulgarelli U.* A numerical method for nonhnear free surface conditions in the wave resistance problem. Arch. Mech. 1989. V. 41. No. 2–3. P. 439-447.
15. *Campagna E., Lalli F., Bulgarelli U.* A boundary element method for a non-linear free surface problem. Intern. J. Numerical Method in Fluids. 1989. V.9. No. 10. P. 1195–1206.
16. *Campagna E., Lalli F., Bulgarelli U.* A numerical solution of the nonlinear wave resistance problem for simple shaped submerged bodies. Meccanica, 1990.V. 25. No. 4. P. 258–260.

### References

1. *Michell J.H.* Wave–Resistance of a Ship, Philosophical Magazine, 1898, Vol. 45, Ser.5, pp106–123.
2. *Wigley W.C.S.* (1942), Calculated and Measured Wave Resistances for a Series of Forms Defined Algebraically, the Prismatic Coefficient and Angle of Entrance Being Varied Independently, Trans. INA, Vol. 84.
3. *Wigley W.C.S. and Lunde J.K.* (1948), Calculated and Observed Wave Resistances for a Series of Forms of Fuller Midsections, Trans. INA, Vol. 90.
4. *Newman J.N.* Marine Hydrodynamics, the MIT Press, 1977, pp. 260–284.
5. *Lewis E.V.* Principles of Naval Architecture, Volume II, Second Edition, 1988, Resistance, SNAME, pp. 54–62.
6. *Kamil M.S., Abdul Ghani M.P., Abdul Malik A.M., Rozhdestvenskiy K.V.* An Accurate Ship Wave Resistance of an Improved Michell-Wigley Equation, International Conference on Engineering Technology 2011 (ICET 2011), Kuala Lumpur, 6–8 December 2011.
7. Ship Wave Resistance, A Comparison of Mathematical Theory with Experimental Results, W.C.S Wigley, 67<sup>th</sup>-Session of the Spring Meetings INA, 1926.
8. Wave Resistance Formula of JH Michell's and its Significance in Ship Hydrodynamics, E.O. Tuck, J. Austral. Math. Soc. Ser. B 30, 1989, pp. 365–377.
9. Study of Michell's Integral and Influence of Viscosity and Ship Hull Form on Wave Resistance, A. Sh. Gotman, Oceanic Engineering International, Volume 6, No. 2, 2002, pp. 74–115.
10. Computation of Nonlinear Ship Waves, S.W. Song, and R.E. Baddour, International Journal for Numerical Mehods in Fluids, November 1989.
11. Ship Wave Resistance, Wigley C, Trans. NECI, Volume 47, 1931.
12. Study of Total and Viscous Resiatance for the Wigley Parabolic Ship Form, Sangseon Ju, IIHR Report No. 261, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, April 1983.
13. A Three-Dimensional Linear Analysis of Steady Ship Motion in Deep Water, Job Johannes Maria Baar, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Brunel University, Uxbridge, United Kingdom, November 1986.
14. *Campagna E., Lalli F., Bulgarelli U.* A numerical method for nonhnear free surface conditions in the wave resistance problem. Arch. Mech. 1989. V. 41. No. 2–3. P. 439-447.
15. *Campagna E., Lalli F., Bulgarelli U.* A boundary element method for a non-linear free surface problem. Intern. J. Numerical Method in Fluids. 1989. V.9. No. 10. P. 1195–1206.
16. *Campagna E., Lalli F., Bulgarelli U.* A numerical solution of the nonlinear wave resistance problem for simple shaped submerged bodies. Meccanica, 1990.V. 25. No. 4. P. 258–260.

УДК 532.526

## ВЫЧИСЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛА ТАКА-ЛАЗАУСКАСА ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ КАТАМАРАНА С ФУНКЦИЕЙ НЬЮМЕНА ВОЛНОВОЙ АМПЛИТУДЫ МЕТОДОМ КОНЕЧНОГО КОРНЯ

**Камил М. С.**, аспирант,

Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
Санкт-Петербург, Россия

Малазийский институт морского инжиниринга университета Куала-Лумпур  
Лумут, Перак, Малайзия  
E-mail: mdsalim@unikl.edu.my

### АННОТАЦИЯ

Основной целью данной работы является развитие предложенного автором метода конечного корня вычисления волнового сопротивления на случай двухкорпусного судна с применением волнового интеграла Така-Лазаускаса (1998) для катамаранов и функции волновой амплитуды Ньюмена (1977). Обсуждаемый подход к решению задачи базируется на линейной теории тонкого судна впервые предложенной Митчелем. В данной работе выражение для вычисления волнового сопротивления в форме Така-Лазаускаса модифицировано в том смысле, что для его расчета требуется определение конечного корня волнового интеграла. Существует предельное значение угла распространения первичных волн  $\theta_{pmax}$  наиближайшее к значению  $\pi/2$ , которое определяет верхний предел интегрирования в формуле Така-Лазаускаса для определения волнового сопротивления катамарана и в формулах Митчела-Виглея и Ньюмена.  $\theta_{pmax}$  представляет собой максимально возможное значение корня волнового интеграла. Задачи определения волнового сопротивления судна решены посредством интегрирования по методу Симпсона. Метод решения и полученные теоретические результаты апробированы экспериментально на модели катамарана, с параболическими корпусами Виглея, а также сравнены с экспериментальными и теоретическими работами других авторов, в том числе для моделей Национальной физической лаборатории с круглыми скулами. Показано, что результаты теоретического анализа на основе метода конечного корня хорошо с опытными данными и оказываются более точными по сравнению с другими известными методами.

**Ключевые слова:** метод конечного корня, линейная теория тонкого судна, интеграл волнового сопротивления, функции волновой амплитуды, первичная волновая интегральная функция.

## SOLVING TUCK-LAZAUSKAS SHIP WAVE RESISTANCE EQUATION OF TWIN-HULL SHIPS IN CONJUNCTION WITH NEWMAN WAVE AMPLITUDE FUNCTION BY FINAL ROOT METHOD

**Kamil M. S.**, PhD Candidate

Saint Petersburg State Marine Technical University

Sankt-Petersburg, Russia

Universiti Kuala Lumpur Malaysian Institute of Marine Engineering Technology

Lumut, Perak, Malaysia

E-mail: mdsalim@unikl.edu.my

### ABSTRACTS

The main objective of this paper is to put forward a final root method of solution utilizing ship wave resistance equation of twin-hull ships by Tuck-Lazauskas (1998) in conjunction with the Newman (1977) wave amplitude function. The underlying principle of the solution adopted is based on the linear thin ship theory pioneered by Michell. In this study the ship wave resistance integral equation by Tuck-Lazauskas is being revitalized in the sense that the solution of the ship wave resistance first requires the determination of the final root of solution of the ship wave resistance integral. There exists a limiting propagation angle of the primary waves  $\theta_{pmax}$  closest to  $\pi/2$  which establishes the maximum limit of the mathematical integration of the governing ship wave equation instead of exactly  $\pi/2$  as in the original ship wave resistance equations of twin-hull ships by Tuck-Lazauskas and the demihull ship wave resistance integrals by MichellWigley and Newman.  $\theta_{pmax}$  is the absolute root of solution of the ship wave resistance integral and it is the closest wave propagation angle to  $\pi/2$  and there should be no

other root of minima beyond. The ship wave resistance problems are solved with the use of a tabular mathematical computational method. The method of solution and the theoretical results are validated experimentally utilizing a non-staggered twin-hull ship model of an identical Wigley parabolic hull form models and also validated against works of others experimentally and theoretically utilising National Physical Laboratory (NPL) round bilge hull forms. The results obtained from the theoretical analyses by final root method are found to be at par with the experimental results and also found to be more superior in terms of its accuracy than those obtained by other methods of solution by works of others presented in this study.

**Key words:** Final root method, linear thin ship theory, ship wave resistance integral, interacted wave amplitude function, primary wave integral function.

## Введение

Двухкорпусные суда или катамараны имеют определенные преимущества перед однокорпусными судами равного водоизмещения в том, что они имеют более высокую скорость, значительно большую площадь палубы, более устойчивую платформу, меньшую осадку, менее предрасположены к бортовой качке, имеют (в определенном диапазоне чисел Фруда) меньшее волновое сопротивление в связи с более тонкими корпусами и, неизменно, меньшее полное сопротивление. К недостаткам катамаранов по сравнению с однокорпусными судами относят большую килевую и вертикальную качку, большую сложность конструкции, хаотическое волновое взаимодействие корпусов и большее вязкостное сопротивление в диапазоне более высоких скоростей. Многочисленные исследования возможности получения более точных решений задачи волнового сопротивления судна продолжаются с давних пор и до настоящего времени, что подчеркивает важность настоящей работы.

За это время разработано много фундаментальных и традиционных методов. Спрос на более точные решения привел к более глубокому изучению классических задач в сочетании с разработкой современных подходов. Фокусом этой работы является представление метода конечного корня (МКК) для расчета волнового сопротивления по формуле Така-Лазаускаса для катамаранов (1998), в дальнейшем использованной Фалтинсеном (2005) на базе фундаментальной теории тонкого судна Митчела (1898) и последующих работ Виглея (1942), Виглея и Лунде (1948), а также Ньюмена (1977). Здесь формула Така-Лазаускаса модифицируется в том смысле, что она требует определения конечного корня волнового интеграла. Существует предельное значение угла распространения первичных волн  $\theta_{pmax}$ , который соответствует верхнему пределу интеграла для вычисления волнового сопротивления. Теоретические результаты апробированы экспериментально с применением моделей катамаранов, составленных из параболических корпусов Виглея и круглоскульных корпусов Национальной физической лаборатории (NPL)..

### 1. Постановка задачи

#### 1.1. Основная формула для двухкорпусных судов

В этом исследовании сделан акцент на формуле Така-Лазаускаса для волнового сопротив-

ления катамаранов в двух конфигурациях корпусов. Эта формула связана с формулами Митчела-Виглея и Ньюмена, а также функциями волновой амплитуды для одного корпуса катамарана. Волновая система в глобальной системе координат  $(x, y, z)$  и начальными  $(x_0, y_0, z_0)$  для много-корпусных судов выражается следующим образом:

$$\zeta_j(x, y) = \operatorname{Re} \int A_j(\theta) \exp[-ig/U^2 \cos^2 \theta] (x_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta) \exp[-ig/U^2 \cos^2 \theta] (x \cos \theta + y \sin \theta) d\theta; \quad -\pi/2 < \theta < \pi/2 \quad (1)$$

В общем случае функция волновой амплитуды записывается так:

$$A(\theta) = \sum A_j(\theta) \exp[-ig/U^2 \cos^2 \theta] (x \cos \theta + y \sin \theta); \quad j = 1, 2, \dots n \quad (2)$$

Вычисляя действительную часть, имеем:

$$A(\theta) = \sum A_j(\theta) \cos[-g/U^2 \cos^2 \theta] (x \cos \theta + y \sin \theta); \quad j = 1, 2, \dots n \quad (3)$$

Значение амплитудной функции в диаметральной плоскости имеет место при  $y = 0$ ;

$$A(\theta)_{CP} = \sum A_j(\theta) \cos[-g/U^2 \cos^2 \theta] x; \quad j = 1, 2 \dots n \quad (4)$$

Волновое сопротивление катамарана  $R_w$  в большой степени зависит от квадрата скорости  $U^2$ , квадрата функции волновой амплитуды  $|A(\theta)|^2$ , фактора взаимодействия корпусов катамарана  $HIFT(\theta)$  и куба косинуса угла распространения волн  $\theta$  (то есть  $\cos^3 \theta$ ), ассоциированного с системой волн. Математическое выражение для вычисления волнового сопротивления по Таку-Лазаускасу получается из формулы для много-корпусного судна при  $j = 1$  до 2, при отсутствии продольного сдвига между корпусами, при  $x = 0$  и амплитудной функции Ньюмена для одного корпуса катамарана в следующем виде:

$$R_w = (\pi \rho U^2 / 2) \int |A(\theta)|^2 HIFT(\theta) \cos 3\theta d\theta; \quad -\pi/2 < \theta < \pi/2 \quad (5)$$

При использовании для одного корпуса катамарана амплитудной функции Митчела-Виглея, математическое выражение для волнового сопротивления катамарана по Таку-Лазаускасу имеет вид :

$$R_w = \frac{(4g^2/\pi U^2)}{0 \leq \theta \leq \pi/2} \int (I^2 + J^2) HIF_T(\theta) \sec^3 \theta d\theta; \quad (6)$$

$$J = bd \iint (\delta\eta/\delta\xi) \exp(dg\xi \sec^2 \theta / U^2) \sin(\lg\xi \sec \theta / U^2) \delta\xi \delta\zeta; -1 \leq \xi \leq +1, 0 \leq \zeta \leq 1 \quad (7)$$

$$I = bd \iint (\delta\eta/\delta\xi) \exp(-dg\xi \sec^2 \theta / U^2) \cos(\lg\xi \sec \theta / U^2) \delta\xi \delta\zeta; -1 \leq \xi \leq +1, 0 \leq \zeta \leq 1 \quad (8)$$

Фактор поперечного взаимодействия корпусов  $HIF_T(\theta)$  имеет вид:

$$HIF_T(\theta) = 4 \cos^2 [0.5(2p/L) \sin\theta / (Fn^2 \cos^2 \theta)] \quad (9)$$

По Митчелу-Виглею для амплитудной волновой функции тонкого судна имеем:

$$\iint_{CP} (\delta\eta/\delta x) \exp[u \sec^2 \theta (z + ix \cos \theta)] dz dx = I_{CP} \quad (10)$$

Поэтому  $A(\theta)_{CP} = (2u/\pi) \sec^3 \theta I_{CP}$ .  $A(\theta)_{CP}$  есть амплитудная волновая функция, рассчитанная в диаметральной плоскости судна, нижний индекс  $CP$  относится к диаметральной плоскости, а  $u = g/U^2$ .

Гипотетически, величина волнового сопротивления движущегося в воде судна зависит также от точного значения максимального результирующего угла распространения комбинированных расходящихся и поперечных волн. Этот угол устанавливает верхний предел интегрирования при вычислении волнового сопротивления, который должен использоваться вместо предела  $\pi/2$  в оригинальных формулах Ньюмена и Митчела-Виглея, причем для определенной скорости судна этот угол определяется путем нахождения корней первичной волновой интегральной функции. Этот уникальный угол можно назвать точным результирующим значением угла распространения волн и обозначить как  $\theta_{pmax}$ . В этом случае также как и для однокорпусного судна существует первичная волновая функция непосредственно связанная с первичной волновой системой, генерируемой движущимся катамараном.

С математической точки зрения интегральная функция  $R_w$  содержит бесконечное число корней. В силу высокочастотных осцилляций этих сложных интегралов определение корней представляют собой довольно сложную задачу. Однако корни могут быть найдены путем итераций и иллюстрироваться графически путем нанесения расчетных данных по интегральной функции волнового сопротивления в зависимости от угла распространения  $\theta$  (то есть  $fR_w$  от  $\theta$ ).  $fR_w$  представляет собой волновую функцию данного судна без учета констант интегрирования. Расположение бесконечных корней соответствует точкам изменения кривизны, когда наклоны кривых изменяют знак от положительного к (+ve к -ve) для точек максимума или от отрицательных к положительным (-ve к +ve) для точек минимума, так что кор-

ни совпадают со значениями  $\theta$  при которых производная  $dR_w/d\theta$  обращается в нуль. В исследовании делается акцент на определении конечного корня соответствующего минимуму, который в общем случае существует в диапазоне  $\theta$  вблизи  $\pi/2$ . Конечным корнем интегральной функции волнового сопротивления будет так называемый максимальный результирующий угол распространения  $\theta_{pmax}$  соответствующий точке минимума кривой  $fR_w$  за которой отсутствуют другие корни, соответствующие минимуму.

Можно получить формы интегральной функции волнового сопротивления так называемой первичной волновой системы, а также построить соответствующие графики демонстрирующие существование конечного корня. Эти формы получены посредством расчета волновой интегральной функции без учета постоянных интегрирования и при подходящем выборе интервалов по  $\theta$  и должны удовлетворять условию возрастания волновой интегральной функции и стремления ее к бесконечности при углах, превышающих  $\theta_{pmax}$ .  $\theta_{pmax}$  соответствует абсолютно точному решению проблемы определения волнового сопротивления судна. Поэтому, интеграл волнового сопротивления катамарана вычисляется с верхним пределом равным  $\theta_{pmax}$ . Такая методология является новой при рассмотрении сильно осциллирующих интегральных функций волнового сопротивления катамаранов и называется «методом конечного корня» (МКК).

## 1.2. Модифицированное основное уравнение

Двухкорпусное судно. Модифицированная интегральная функция или формула волнового сопротивления для двухкорпусных судов может быть записана математически в следующем виде при верхнем пределе интегрирования равном точному значению конечного корня  $\theta_{pmax}$ :

$$R_w = (\pi r U^2) \int |A(\theta)_{CP}|^2 HIFT(\theta) \cos 3\theta d\theta; \quad 0 < \theta < \theta_{pmax} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} A(\theta)_{CP} &= (2u/\pi) \sec 3\theta \iint (\delta\eta/\delta x) \exp[u \sec 2\theta \cdot \\ &\quad (z + ix \cos \theta)] dz dx \\ &= 2u/\pi) \sec 3\theta \iint \eta x \exp[(gz/U^2) \sec 2\theta] \\ &\quad \cos[(gx/U^2) \sec \theta] dz dx; \quad 0 < z < d, -l < x < +l \\ &= (2u/\pi) \sec 3\theta I_{CP} \end{aligned} \quad (12)$$

$A(\theta)_{CP}$  можно выразить в безразмерном виде по  $z$  и  $x$  следующим образом:

$$\begin{aligned} A(\theta)_{CP} &= bd(2u/\pi) \sec 3\theta \iint \eta x \exp[(g\xi/U^2) \sec 2\theta] \\ &\quad \cos[(g\xi/U^2) \sec \theta] d\xi d\zeta; \\ &0 < \zeta < d, -1 < \xi < +1 \end{aligned} \quad (13)$$

Где:

$\zeta = z/d$ ,  $\xi = x/l$ ,  $l = L/2$ ,  $\eta x = \partial y/\partial x$   
 $L$  – Длина судна,  $d$  – Осадка судна

## 2. Методика расчета

### 2.1. Интегрирование

При применении расчетной методики как для однокорпусных, так и для двухкорпусных судов, различные по главным измерениям варианты корпусов разбиваются шпангоутными сечениями на равные интервалы по длине судна и сечениями плоскостями ватерлиний в вертикальном направлении от свободной поверхности до киля. Математическая процедура интегрирования предусматривает использование правила Симпсона.

Интегрирование проводится по сечениям, сначала по направлению  $\eta$ - $\zeta$  в каждом шпангоутном сечении корпуса, а затем в направлении  $\xi$  по длине корпуса с целью вычисления интеграла от мидель-шпангоута. Координатная система для корпусов катамарана показана на Рис. 1 и 2. Далее интегрирование продолжается по угловой переменной  $\theta$  от нуля до  $\theta_{pmax}$  чтобы наконец определить  $R_w$ . При этом шаг по углу на основной части промежутка интегрирования принят в 1 градус, вблизи результирующего угла  $\theta_{pmax}$

более мелкое. Значения интеграла  $I$  считаются как результат расчета с привлечением подпрограмм одного из идентичных корпусов. Эффект поперечного взаимодействия корпусов (фактор  $HIF_T(\theta)$ ) и соответствующая волновая амплитудная функция рассчитывается с применением выражения, приведенного выше.

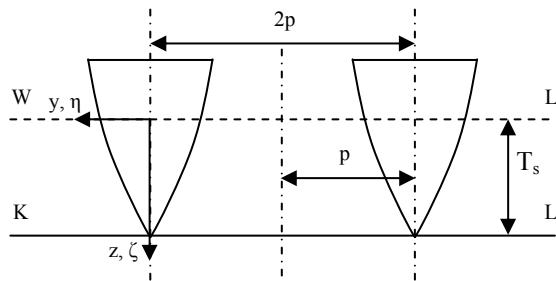


Рис. 1 – Двухкорпусная конфигурация (вид в поперечном сечении)

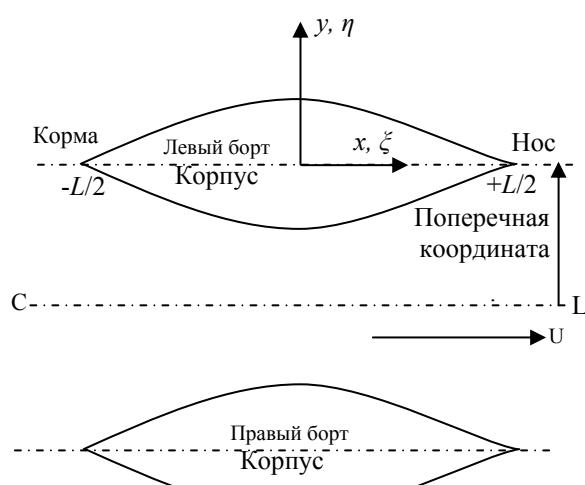


Рис. 2. Двухкорпусная конфигурация и система координат

### Главные размерения модели (Корпус 1 Виглея)

Длина по ватерлинии, $L_{WL}$	- 1.8 м
Осадка, $T$	- 0.113 м
Ширина по ватерлинии, $B_{WL}$	- 0.180 м
Площадь смоченной поверхности $S$ при осадке $T$	- 0.482 м <sup>2</sup>

### Главные размерения модели (Корпус 2 Виглея)

Длина ватерлинии, $L_{WL}$	- 3.048 м
Осадка, $T$	- 0.191 м
Ширина по ватерлинии, $B_{WL}$	- 0.305 м
Площадь смоченной поверхности $S$ при осадке $T$	- 1.381 м <sup>2</sup>

### Главные размерения модели (Корпус NPL)

Длина по ватерлинии, $L_{WL}$	- 1.600 м
Осадка, $T$	- 0.089 м
Ширина по ватерлинии, $B_{WL}$	- 0.178 м
Площадь смоченной поверхности $S$ при осадке $T$	- 0.338 м <sup>2</sup>

## 3. Экспериментальный и теоретический анализ коэффициентов волнового сопротивления для катамарана

### 3.1. Экспериментальный анализ

Экспериментальный анализ волнового сопротивления судна выполнялся на основе рекомендаций ITTC и форм-фактора Прохаски 1957 для идентичного корпуса Виглея с размерениями приведенными выше. Экспериментальные данные для катамарана (Корпус 1 Виглея) были предоставлены

Центром морских технологий Малайзийского технологического университета и анализировались с целью апробации теоретического подхода, основанного на методе конечного корня. Данные по полному сопротивлению  $R_T$  были получены в результате эксперимента, проведенного в диапазоне числа Фруда от 0.3 to 1.0 и при разбивке корпуса  $2p/L$  из 0.3, 0.4 and 0.5. Данные экспериментального анализа приведены в следующих таблицах и рисунках. Другие экспериментальные результаты заимствованы непосредственно из работ других авторов с предоставлением соответствующих ссылок.

### 3.2. Теоретический анализ

Теоретический анализ выполнен на основе модифицированной формулы волнового сопротивления многокорпусного судна. Значения интегралов  $I$  и  $J$  для избранной разбивки по  $\theta$  предварительно рассчитываются отдельно. Далее для каждого и интервала изменения  $\theta$  и волнового сопротивления  $R_w$  при заданной скорости проводится расчет фактора взаимодействия корпусов  $HIF_T(\theta)$ . Далее необходимо итерировать расчет  $R_w$  вплоть до получения конечного значения  $\theta_{pmax}$ .

Получены и проиллюстрированы графически характерные формы интегральных функций со-

противления, что доказывает существование конечного корня  $\theta_{pmax}$  и соответствующих первичных интегральных функций. Далее расчеты  $R_w$  продолжены для различных значений скорости и положения шпангоутных сечений, отнесенных к длине судна  $2p/L$ . Дополнительная апробация метода конечного корня также выполнена с привлечением работ Инселя, Молланда и Велликома, использовавших корпуса NPL.

### 3.3. Результаты экспериментального и теоретического анализа для двухкорпусного судна

Исследование для катамарана выполнено для следующих случаев:

Случай 1 – Корпус 1 Виглея Wigley Hull 1, MKK, Метод Ньюмена для оценки интегральной волновой функции и сопротивления одного корпуса в сравнении с экспериментом при  $2p/L = 0.3, 0.4, 0.5$ .

Случай 2 – Корпус 1 Виглея, MKK, Метод Митчела-Виглея для оценки интегральной волновой функции и сопротивления одного корпуса в сравнении с экспериментом при  $2p/L = 0.3, 0.4, 0.5$ .

Случай 3 – Корпус NPL, MKK, Метод Ньюмена для оценки интегральной волновой функции и сопротивления одного корпуса в сравнении с экспериментом при  $2p/L = 0.3, 0.5$ , а также в сравнении с методом Инселя-Молланда-Велликома.

Случай 4 – Корпус NPL, MKK, Final Root, Метод Митчела-Виглея для оценки интегральной волновой функции и сопротивления одного корпуса в сравнении с экспериментом при  $2p/L = 0.3, 0.5$ , а также в сравнении с методом Инселя-Молланда-Велликома

Общие результаты экспериментального и теоретического анализа для катамарана представлены в таблицах 1 - 8 и на рисунках 3 - 9 на следующих страницах.

Таблица 1

### Коэффициент волнового сопротивления $C_w$ – Корпус 1 Виглея, эксперимент

$F_n$	Эксперимент $10^3 \times C_w$		
	$2p/L=0.3$	$2p/L=0.4$	$2p/L=0.5$
0.30	1.5826	1.5103	1.7858
0.40	3.7844	3.7955	4.3316
0.50	6.4500	6.7468	6.4371
0.60	4.8579	4.6554	5.4152
0.70	3.7163	3.9139	4.7581
0.80	3.2283	3.7522	4.4194
0.90	3.2250	3.9420	4.3490
1.00	3.5140	3.9088	3.8347

Таблица 2  
Коэффициент волнового сопротивления  $C_w$  –  
Корпус Виглея, теория, MKK,  
Модифицированный метод Ньютона

$F_n$	Теория $10^3 \times C_w$		
	$2p/L=0.3$	$2p/L=0.4$	$2p/L=0.5$
0.30	1.5069	1.4326	1.6989
0.40	3.5988	3.6174	4.1219
0.50	6.1468	6.3977	6.1209
0.60	4.6315	4.4246	5.1478
0.70	3.5410	3.7217	4.5209
0.80	3.0671	3.5662	4.2025
0.90	3.0708	3.8249	4.1329
1.00	3.3497	3.7234	3.6440

Таблица 3  
Различие в процентах данных теории  
и эксперимента  $C_w$  – Корпус 1 Виглея, MKK,  
Метод Ньюмена

$F_n$	Различие в процентах (%) теории и эксперимента $C_w$		
	$2p/L = 0.3$	$2p/L = 0.4$	$2p/L = 0.5$
0.30	4.769	5.127	4.854
0.40	4.890	4.679	4.825
0.50	4.686	5.159	4.897
0.60	4.645	4.944	4.924
0.70	4.702	4.896	4.969
0.80	4.978	4.942	4.892
0.90	4.766	4.839	4.952
1.00	4.661	4.727	4.960

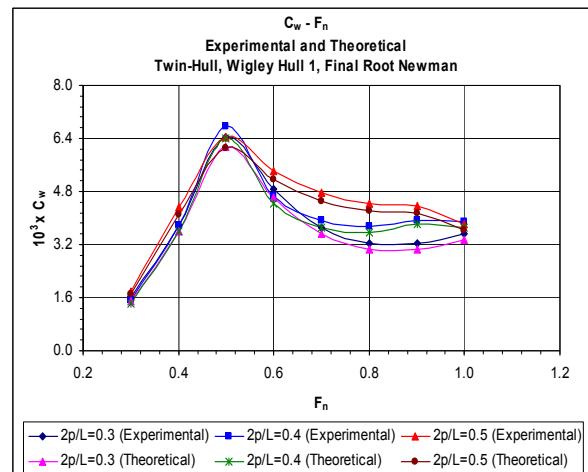


Рис. 3. Графики экспериментальных и теоретических значений  $C_w$ , катамаран, корпус Виглея, MKK, Метод Ньюмена

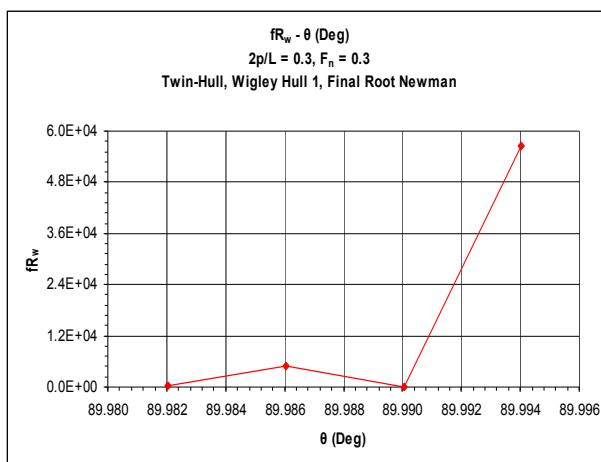


Рис. 4. Характерная функция формы интеграла  $fR_w$ , (МКК, метод Ньюмена  $F_n = 0.3$ ,  $2p/L = 0.3$ )

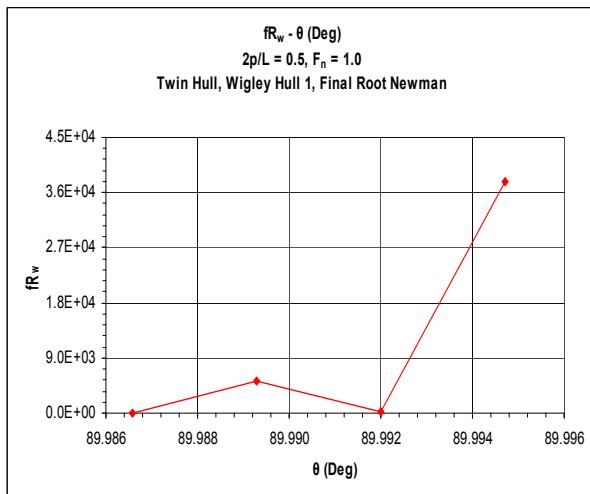


Рис. 5. Характерная функция интеграла  $fR_w$  (МКК, Метод Ньюмена,  $F_n = 1.0$ ,  $2p/L = 0.5$ )

$F_n$	Теория $10^3 \times C_w$		
	$2p/L=0.3$	$2p/L=0.4$	$2p/L=0.5$
0.30	1.5011	1.4324	1.6938
0.40	3.5900	3.6009	4.1101
0.50	6.1195	6.3978	6.1038
0.60	4.6054	4.4172	5.1355
0.70	3.5215	3.7109	4.5152
0.80	3.0625	3.5578	4.1973
0.90	3.0578	3.8132	4.1224
1.00	3.3324	3.7046	3.6338

Таблица 5  
Различие в процентах между теоретическими и экспериментальными значениями  $C_w$  – Корпус 1 Виглея, МКК, Метод Митчела-Виглея

$F_n$	Различие в процентах (%) Difference между экспериментальными и теоретическими значениями $R_w$		
	$2p/L = 0.3$	$2p/L = 0.4$	$2p/L = 0.5$
0.30	5.135	5.141	5.137
0.40	5.123	5.114	5.099
0.50	5.110	5.158	5.163
0.60	5.183	5.101	5.151
0.70	5.227	5.172	5.088
0.80	5.119	5.166	5.010
0.90	5.170	5.130	5.194
1.00	5.154	5.209	5.225

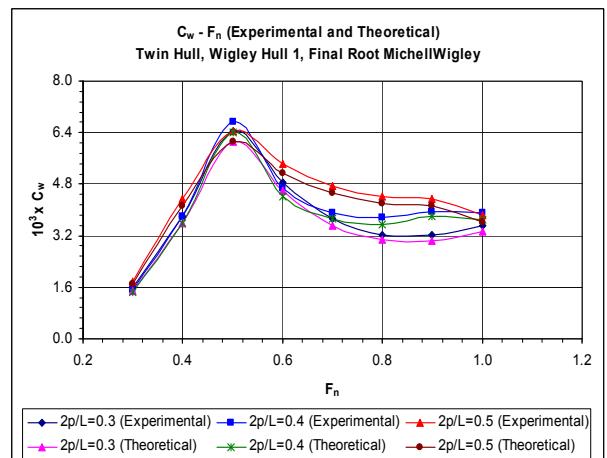


Рис. 6. Графики экспериментальных и теоретических значений  $C_w$ , Катамаран, Корпус 1 Виглея, МКК, Метод Митчела-Виглея

Таблица 6  
Теоретическое значение коэффициента  $C_w$   
 $2p/L = 0.3$  – Корпус NPL

$F_n$	Инсель-Молланд-Велликом (IMW)	Ньюмен (МКК)	
	$C_w \times 10^3$ (Exp)	$C_w \times 10^3$ (Theor)	$C_w \times 10^3$
0.30	2.200	3.000	2.132
0.35	3.000	1.000	2.909
0.40	4.000	3.000	3.875
0.46	6.600	5.900	6.398
0.50	6.000	5.600	5.812
0.60	4.000	3.600	3.873
0.70	2.700	2.600	2.616
0.80	1.800	1.700	1.744
0.90	1.500	1.400	1.453
1.00	1.400	1.300	1.356

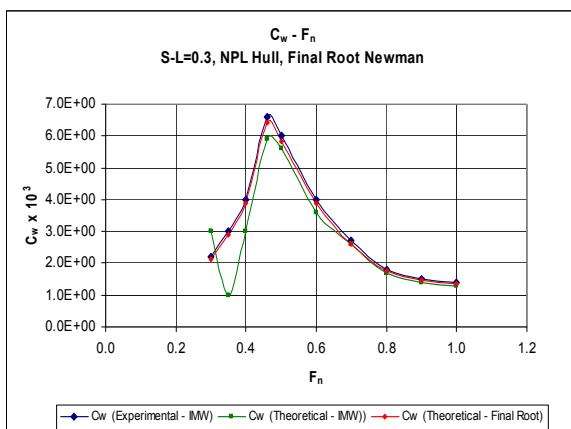


Рис. 7. Графики экспериментальных и теоретических значений  $C_w$  в функции от числа Фруда  $F_n$ ,  $2p/L = 0.3$  – Корпус NPL

Таблица 8  
Теоретическое значение коэффициента  $C_w$   
 $2p/L = 0.5$  – Корпус NPL

$F_n$	Инсель-Молланд-Велликом (IMW)	Митчел-Виглей (MKK)
	$C_w \times 10^3$ (Эксп.)	$C_w \times 10^3$
0.30	2.200	2.400
0.35	2.400	1.200
0.40	3.800	2.400
0.46	5.200	4.300
0.50	4.800	4.200
0.60	3.400	3.200
0.70	2.700	2.600
0.80	2.100	2.000
0.90	1.700	1.600
1.00	1.500	1.400

Таблица 7

Различие в процентах теоретических и экспериментальных значений  $R_w$ ,  $2p/L = 0.3$  – Корпус NPL

$F_n$	Инсель-Молланд-Велликом		Ньюмен (MKK)		
	$R_w$ (N) (Exp)	$R_w$ (N) (Theo)	% Diff	$R_w$ (N)	% Diff
0.30	1.047	1.427	-36.364	1.014	3.11
0.35	1.943	0.648	66.667	1.883	3.04
0.40	3.383	2.537	25.000	3.277	3.12
0.46	7.382	6.599	10.606	7.157	3.05
0.50	7.929	7.401	6.667	7.681	3.13
0.60	7.612	6.851	10.000	7.371	3.16
0.70	6.994	6.735	3.704	6.775	3.12
0.80	6.089	5.751	5.556	5.899	3.13
0.90	6.423	5.994	6.667	6.222	3.12
1.00	7.401	6.872	7.143	7.169	3.13

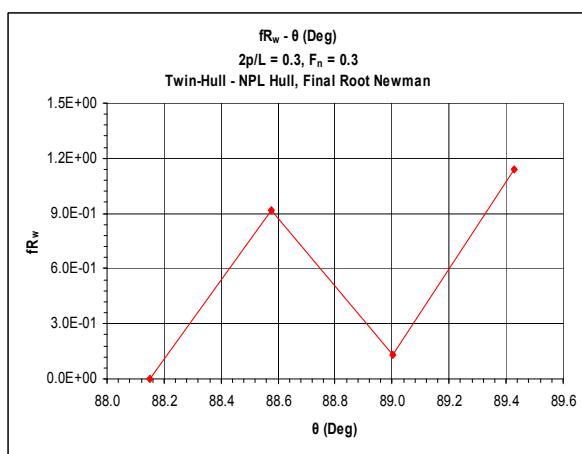


Рис. 8. Характерная функция формы интеграла  $R_w$  (Катамаран, Корпус NPL,  $F_n = 0.3$ ,  $2p/L = 0.3$ )

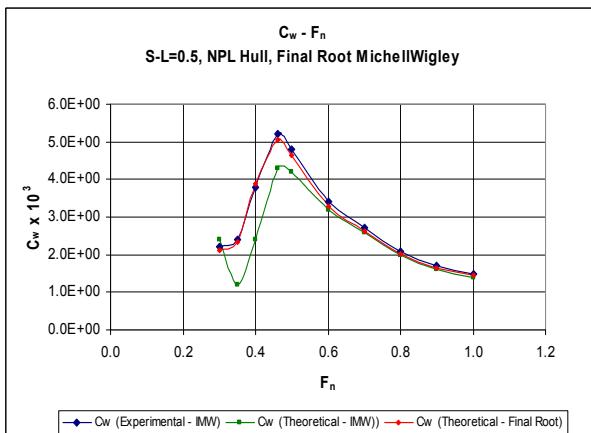


Рис. 9. Графики экспериментальных и теоретических значений  $C_w$  в функции от  $F_n$   $2p/L = 0.5$  – Корпус NPL

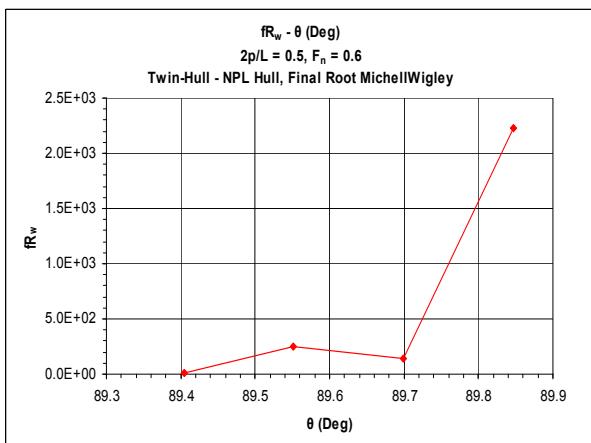


Рис. 10. Характерная функция формы интеграла  $fR_w$  (Катамаран, Корпус NPL,  $F_n = 0.6$ ,  $2p/L = 0.5$ )

## Заключение

Судя по близости теоретических и экспериментальных результатов можно заключить, что метод конечного корня достаточно эффективен. Различие в данных расчета и эксперимента укладывается в диапазон 3%–5%.

Можно констатировать, что так называемый «Метод конечного корня», примененный в данном исследовании прошел апробацию и может быть применен для расчета волнового сопротивления двухкорпусных судов. Очевидно, что этот метод является эффективным альтернативным инструментом оценки волнового сопротивления катамаранов, имеющим несомненные преимущества перед другими инженерными методами оценки волнового сопротивления судов.

### Благодарности

Автор выражает благодарность профессору К.В. Рождественскому за ценные замечания и рекомендации по выполнению данной работы.

Автор высоко ценит вклад Центра морских технологий Малайзийского университета технологий (МТС-УТМ), любезно предоставившего экспериментальные данные по моделям катамаранов с корпусами Виглея (типа 1), которые автор использовал для апробации своих теоретических исследований.

Автор также благодарит опытный исследовательский центр HSVA (Гамбург, Германия), Королевский флот Малайзии и судостроительный завод Boustead Naval Shipyard Sendirian Berhad за разрешение использовать экспериментальные данные по кораблю прибрежной зоны (LCS).

### Литература

1. *Michell J.H.* Wave–Resistance of a Ship, Philosophical Magazine, 1898, Vol. 45, Ser.5, pp106–123.
2. *Wigley W.C.S.* (1942), Calculated and Measured Wave Resistances for a Series of Forms Defined Algebraically, the Prismatic Coefficient and Angle of Entrance Being Varied Independently, Trans. INA, Vol. 84.
3. *Newman J.N.* Marine Hydrodynamics, the MIT Press, 1977, pp. 260–284.
4. Optimum Hull Spacing of a Family of Multihulls, E. O. Tuck and L. Lazauskas, Applied Mathematics Department, University of Adelaide, Australia, June 1998.
5. Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles, ODD M. Faltinsen, Norwegian University of Science and Technology, Cambridge University Press, 2005, pp. 115–120 and pp. 120–135 .
6. *Kamil M.S., Abdul Ghani M.P., Abdul Malik A.M., Rozhdestvenskiy K.V.* Revitalizing the Theoretical Approach of Predicting Ship Wave Resistance, Marine Science and Technology Conference 2011 (MARSTEC2011), Kuala Lumpur, 12–13 September 2011.
7. CFD Prediction of the Wave Resistance of a Catamaran With Staggered Demihulls, Prasanta K. Sahoo, Lawrence J. Doctors, Luke Pretlove, International Conference on Marine Hydrodynamics 5–7 January 2006 (MAHY 2006), Visakhapatnam, India.
8. Study of Total and Viscous Resiatance for the Wigley Parabolic Ship Form, Sangseon Ju, IIHR Report No. 261, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, April 1983.
9. *Insel M., Molland A.F. and Wellcome J.F.* Wave Resistance Prediction of a Catamaran by Linearised Theory, Proceedings of CAMO 94, 59-67M, 1994.

### References

1. *Michell J.H.* Wave–Resistance of a Ship, Philosophical Magazine, 1898, Vol. 45, Ser.5, pp106–123.
2. *Wigley W.C.S.* (1942), Calculated and Measured Wave Resistances for a Series of Forms Defined Algebraically, the Prismatic Coefficient and Angle of Entrance Being Varied Independently, Trans. INA, Vol. 84.
3. *Newman J.N.* Marine Hydrodynamics, the MIT Press, 1977, pp. 260–284.
4. Optimum Hull Spacing of a Family of Multihulls, E. O. Tuck and L. Lazauskas, Applied Mathematics Department, University of Adelaide, Australia, June 1998.
5. Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles, ODD M. Faltinsen, Norwegian University of Science and Technology, Cambridge University Press, 2005, pp. 115–120 and pp. 120–135 .
6. *Kamil M.S., Abdul Ghani M.P., Abdul Malik A.M., Rozhdestvenskiy K.V.* Revitalizing the Theoretical Approach of Predicting Ship Wave Resistance, Marine Science and Technology Conference 2011 (MARSTEC2011), Kuala Lumpur, 12–13 September 2011.
7. CFD Prediction of the Wave Resistance of a Catamaran With Staggered Demihulls, Prasanta K. Sahoo, Lawrence J. Doctors, Luke Pretlove, International Conference on Marine Hydrodynamics 5–7 January 2006 (MAHY 2006), Visakhapatnam, India.
8. Study of Total and Viscous Resiatance for the Wigley Parabolic Ship Form, Sangseon Ju, IIHR Report No. 261, Iowa Institute of Hydraulic Research, The University of Iowa, April 1983.
9. *Insel M., Molland A.F. and Wellcome J.F.* Wave Resistance Prediction of a Catamaran by Linearised Theory, Proceedings of CAMO 94, 59-67M, 1994.

УДК 629.5.015.4:004.942

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ ПРОМЫСЛОВЫХ СУДОВ ПРИ ПОСАДКЕ НА МЕЛЬ, СТОЛКНОВЕНИИ СУДОВ И ВХОДЕ В ЛЕДОВОЕ ПОЛЕ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ

**Бураковский Павел Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры теории эксплуатации судов и промышленного рыболовства Калининградского государственного технического университета, Калининград, Россия  
E-mail: paul\_b@mail.ru

**Нечаев Юрий Иванович**, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной техники и информационных технологий Санкт-Петербургского государственного морского технического университета; профессор кафедры строительной механики корабля и сопротивления материалов Калининградского государственного технического университета  
Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: nechaev@ifmo.mail.ru

### АННОТАЦИЯ

Анализ статистических данных показывает, что столкновения и посадки на мель до настоящего времени относятся к наиболее распространенным видам аварий на судах мирового флота, несмотря на совершенствование средств навигации,. Кроме того, при эксплуатации судов промыслового флота нередко возникает ситуация, связанная с необходимостью захода в битый лед. В статье обсуждаются результаты практической реализации графоаналитической системы при контроле эксплуатационной прочности судов при посадке на мель, столкновениях и входе в ледовое поле на основе современной теории катастроф. Основное внимание уделяется интерпретации экстремальных ситуаций при посадке на мель, столкновении судов и входе в ледовое поле на основе методов строительной механики корабля и достижений современных интеллектуальных технологий. Для случая контроля прочности судна при посадке на мель осуществлен синтез графоаналитической системы, обеспечивающей контроль движения судна на ограниченной акватории при высокой вероятности касания грунта корпусом судна. Применительно к ситуации столкновения судов разработан алгоритм контроля на основе данных измерений и методов математического моделирования с использованием конструктивного решения, позволяющего снизить последствия аварии. Для случая входа судна в ледовое поле проведено нейродинамическое моделирование динамики взаимодействия со средой при различной сплоченности льда, результаты которого использованы при построении функционального модуля интеллектуальной системы контроля эксплуатационной прочности промысловых судов. Таким образом, на основе разработанной интеллектуальной технологии предложен подход и методология мониторинга динамики судна, позволяющая повысить эффективность использования промысловых судов в сложных условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** графоаналитическая система, эксплуатационная прочность, экстремальные ситуации, фрактальные отображения, энтропийный подход, посадка на мель, столкновение, ледовое поле, теория катастроф.

## PRACTICAL REALIZATION OF GRAPHIC-ANALYTICAL CONTROL SYSTEM OF FISHING VESSEL STRENGTH AT GROUNDING, COLLISION AND ENTERING ICE FIELD ON THE BASIS OF MODERN CATASTROPHE THEORY

**Burakovskiy Pavel Evgenievich,**  
Ass. professor of theory, ship performance of commercial fisheries department  
of Kaliningrad state technical university, Kaliningrad, Russia  
E-mail: paul\_b@mail.ru

**Nechaev Yury Ivanovich**, Professor, Dr. of tech. Sc.

Professor of department «Computer science» of State Marine Technical University,  
Professor of department of structural mechanics of ship and strength of materials of Kaliningrad  
state technical university, Sankt-Petersburg, Russia  
E-mail: nechaev@ifmo.mail.ru

## ABSTRACTS

The statistical data analysis shows that collisions and groundings are nowadays the most common types of accidents among the world fleet vessels, despite the improvement of navigation means. Besides, there are situations when fishing fleet vessels have to be surrounded by the broken ice. The results of practical application of graphic-analytical system when monitoring the operation strength of fishing vessels in case of grounding, collisions and coming into ice field are discussed in the article on the basis of the modern catastrophe theory. Special attention is paid to the interpretation of emergency situations in case of grounding, collision of vessels and coming into ice field on the basis of both methods of vessel construction mechanics and achievements of modern intelligent technologies. The synthesis of the graphic-analytical system providing the monitoring of the vessel movement in the limited water area when there is a real danger of contact between the hull and the ground is made for the vessel strength monitoring in case of grounding. The algorithm of monitoring the situation with vessels collision on the basis of the measurements and mathematical modeling methods including constructive decision was developed which makes the accident consequences less serious. As for the vessel coming into the territory covered with ice, neurodynamic modeling of the dynamics of interaction with environment at various stages of ice strength was made. The results of the modeling were used in the process of creating the functional module of the intelligent system of monitoring the operational strength of fishing vessels. Thus, a new approach and methodology for the vessel dynamics monitoring were introduced on the basis of the developed intellectual technology. That increases the efficiency of fishing vessels operation in difficult environmental conditions.

**Key words:** graphic-analytical system, operational strength, emergency situations, fractal pictures, entropy approach, grounding, collision, ice field, catastrophe theory.

## Введение

Интерпретация задач эксплуатационной прочности судна на основе графоаналитической системы в рамках предыдущих исследований была рассмотрена применительно к контролю общей прочности и явлению «захвата» при движении судна на встречном волнении. Алгоритмы решения этих задач реализованы на основе теории графоаналитических систем [3], [5]. Создание фрактальной структуры и энтропийного представления динамики ситуации базируется на развитии моделей [4], [6]. Фрактальные компоненты моделей взаимодействия реализованы на основе парадигмы обработки информации в высокопроизводительной вычислительной среде [8], [10].

Приложение графоаналитической системы в задачах контроля текущих ситуаций связано с использованием методов современной теории катастроф. В рамках такого подхода обеспечивается интеграция интеллектуальных технологий и высокопроизводительных средств обработки информации. Эта интеграция привела к использованию фрактального анализа в нейродинамических системах, использующих возможности нейронечеткого и нейроэволюционного моделирования [1], [7], [9].

В настоящей статьедается содержательная интерпретация практических приложений фрактальной графоаналитической системы применительно к построению и анализу моделей взаимодействия в задачах оценки прочности при посадке на мель, столкновении судов и входе судна в

ледовое поле в условиях интенсивного обледенения. Основное внимание уделяется развитию концепции фрактальных структур в виде графоинтерпретации текущих ситуаций в рамках концепции динамической модели катастроф [9].

## 1. Контроль эксплуатационной прочности при посадке судов на мель

Разработка алгоритмов контроля прочности судна при посадке на мель в условиях ограниченной акватории представляет собой одно из важных направлений повышения безопасности мореплавания [2]. Опыт эксплуатации морских судов свидетельствует о том, что посадка на мель является одним из наиболее распространенных видов аварий, в результате чего возникают повреждения корпусных конструкций, а иногда и гибель судна. Характерными повреждениями корпусных конструкций при этом являются разрушение днищевой обшивки, смятие набора двойного дна, повреждение сколовых килей, деформирование листов наружной обшивки в виде гофров, а также повреждение рулей, гребных винтов, смещение или повреждение настилов второго дна вместе с фундаментами механизмов [2]. В последнем случае судно даже после снятия с мели не имеет возможности двигаться своим ходом.

В связи со сложностью задачи воспользуемся методами теории катастроф с использованием графоаналитической системы [3]. В процессе моделирования ситуации на основе принципа кон-

куренции определялась минимальная скорость движения судна в зависимости от глубины воды под килем, при которой возникает процесс присасывания корпуса к грунту. Результаты анализа позволяют резко снизить число соударений, определять безопасную скорость движения судна и прогнозировать вероятную стрелку прогиба элементов днищевых перекрытий после соударения корпуса с грунтом.

Модель, определяющая физические закономерности процесса соударения корпуса с грунтом, учитывает ряд особенностей, которые связаны с посадкой судна на мелководье, наличием вертикальной и килевой качки и с взаимодействием корпуса с грунтом вследствие возникновения силы присасывания. В этих условиях потеря кинетической энергии движения судна при касании днищем грунта происходит за счет трения корпуса о грунт, изменения сопротивления воды движению и энергии, идущей на разрушение днищевых конструкций в зоне контакта с грунтом.

Уравнение энергетического баланса при касании корпусом дна представляется суммой [11]:

$$W_{\text{пост}1} + W_{\text{колеб}1} = W_{\text{пост}2} + W_{\text{колеб}2} + W_{\text{констр}} \quad (1)$$

где  $W_{\text{пост}1}$ ,  $W_{\text{пост}2}$  – кинетическая энергия поступательного движения судна до и после касания,  $W_{\text{колеб}1}$ ,  $W_{\text{колеб}2}$  – кинетическая энергия качки до и после касания;  $W_{\text{констр}}$  – энергия, затраченная на разрушение конструкции днищевых перекрытий.

При ровном дне энергия поступательного движения остается неизменной и на разрушение конструкций пойдет только часть энергии колебаний. Тогда выражение (1) запишется в виде:

$$W_{\text{колеб}1} - W_{\text{констр}} = W_{\text{колеб}2}. \quad (2)$$

В том случае, когда дно имеет существенные неровности, результирующая скорость при ударе будет складываться из скоростей колебательного и поступательного движений, что может привести к большему объему разрушений конструкций. Значение  $W_{\text{колеб}1}$  вычисляется в зависимости от характеристик волнения и параметров движения (курса и скорости), величина  $W_{\text{колеб}2}$  – с учетом амплитуд качки после касания грунта.

Энергия диссипации при пластической деформации связей днищевого перекрытия представляется как сумма:

$$W_{\text{констр}} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4, \quad (3)$$

где  $W_1, W_2, W_3, W_4$  – энергии рассеивания при разрушении днищевых пластин, продольных ребер жесткости, нижней части флоров, вертикального киля и стингера.

При рассмотрении касания грунта корпусом судна можно ограничиться учетом первых двух составляющих  $W_1$  и  $W_2$ , так как деформация флоров и верхнего киля требует больших энерге-

тических затрат, что более характерно для случая посадки ДО на мель. Расчет  $W_1$  и  $W_2$  ведется по пятну контакта в зависимости от числа связей в зоне нагружения. При этом энергия диссипации в пластинах деформируемого участка днищевого перекрытия определяется площадью, ограниченной кривой сила–прогиб для пластины, линией упругой разгрузки и горизонтальной осью. Энергия рассеивания в балочных элементах определяется аналогично, с той лишь разницей, что зависимость сила–прогиб для них определяется с учетом различия в конструкции оконечностей исследуемых судов. На основе рассмотренных физических закономерностей в рамках графоаналитической системы был составлен алгоритм контроля эксплуатационной прочности при посадке на мель. Выполнение алгоритма позволяет установить предельно допустимую энергию рассеивания в конструкциях днища, при которой прогибы элементов не превышают допускаемых значений. Алгоритм контроля прочности днищевых конструкций при посадке на мель изложен ниже.

Шаг 1. На основании зависимостей сила–прогиб для элементов днищевых конструкций и пятна контакта корпуса судна с дном определить предельно допустимую энергию рассеивания при допускаемых прогибах и деформации конструкций при ударе о дно.

Шаг 2. Определить посадку и скорость движения судна, параметры килевой и вертикальной качки, кинетическую энергию поступательного  $W_{\text{пост}1}$  и колебательного движения  $W_{\text{колеб}1}$ .

Шаг 3. Вычислить приращение кинетической энергии  $\Delta W = W_{\text{колеб}1} - W_{\text{констр}}$  (формула 2).

Шаг 4. В случае касания грунта зафиксировать новую скорость поступательного движения судна и параметры качки, вычислить кинетическую энергию поступательного  $W_{\text{пост}2}$  и колебательного движения до  $W_{\text{колеб}2}$ .

Шаг 5. Выполнить сравнение приращения  $\Delta W$  со значением  $W_{\text{колеб}2}$ : если  $\Delta W > W_{\text{колеб}2}$ , то прогибы элементов днищевых конструкций могут превысить нормативные значения и требуется водолазный осмотр. В противном случае, при  $\Delta W < W_{\text{колеб}2}$ , прогибы элементов находятся в допустимых пределах.

Пример граф-интерпретации рассмотренного алгоритма приведен на рис.1, где кривые 1 и 2 учитывают действие на пятно контакта днищевого перекрытия равномерной нагрузки в виде суммы усилий, действующих на элементы конструкции в зоне нагружения (1 – для пластины, 2 – для ребер жесткости). Площади фигур  $\bar{W}_1$  и  $\bar{W}_2$  соответствуют рассеиванию энергии в пластинах обшивки и ребрах жесткости. Допустимая энергия диссипации в конструкциях определяется путем проведения прямых 3 и 4 из точек оси абсцисс, соответствующих предельно допустимым прогибам набора и пластины, параллельно линии упругой разгрузки до пересечения с кривыми 1 и 2.

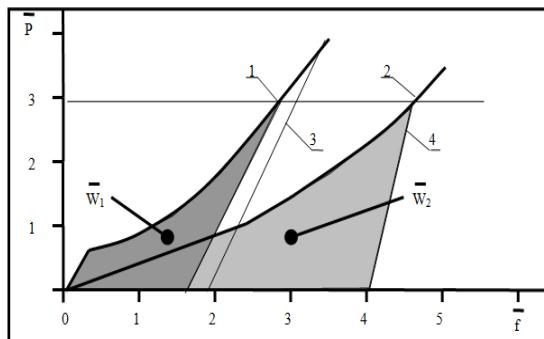


Рис.1. Реализация динамики судна при посадке на мель с помощью графоаналитической системы

## 2. Контроль эксплуатационной прочности при столкновении судов

Возрастание тоннажа и скоростей судов привели к значительному повышению интенсивности судоходства, что в свою очередь повлекло за собой увеличение количества морских аварий. Наибольшая опасность возникновения чрезвычайных ситуаций возникает в аварийных ситуациях при столкновении судов. Помимо прямого ущерба, связанного с разрушением корпусных конструкций и выводом судов из эксплуатации, столкновения приводят к утрате грузов, гибели судов и членов экипажей и часто к серьезным экологическим катастрофам [2].

Физические закономерности, определяющие столкновение судов, характеризуются многими факторами, среди которых следует выделить появление пробоин в бортах, разрушение форштевней, значительные остаточные деформации обшивки и набора корпуса. Основными факторами, влияющими на размеры повреждений при столкновении судов, являются конструктивные характеристики взаимодействующих судов, их водоизмещение и скорости во время столкновения, курсовой угол, расположение повреждения по длине судна. Наиболее опасными являются подводные пробоины, которые образуются при столкновении с судном, имеющим бульб. Применяемая мощная конструктивная защита борта приводит к дополнительным металлизатратам, увеличению веса и стоимости постройки корпуса судна. Низкая эффективность различных способов подкреплений привела к необходимости решения проблемы за счет изменения конструкции имеющихся бульбов с целью уменьшения размеров подводных повреждений [2].

Решение проблемы уменьшения последствий катастроф, связанных с столкновениями судов, оснащенных бульбами, достигнуто путем изменения конструкции носового бульба, продольная несущая способность которого ниже, чем несущая способность бортовых перекрытий судов. Новая конструкция носовой бульбовой наделки имеет увеличенную продольную податливость, исключающую появление подводных пробоин и, как следствие, повышающая безопасность мореплавания [2]. Этот эффект достигается путем выполнения наружной обшивки бульба в виде кольцевых гофр.

Предлагаемая конструкция имеет конусообразную форму, содержит обтекатель и вставку, выполненную в виде гофров и подкрепленную бракетами, а гофры вставки в поперечном сечении имеют каплеобразную форму. При столкновении судов в контакт с подводной частью бортового перекрытия входит бульб, а в надводной части, по мере его деформирования, – верхняя часть форштевня. Так как податливость в продольном направлении бульба предлагаемой конструкции высока, то он деформируется при столкновении, оставляя бортовое перекрытие тараненного судна в подводной части без пробоины. В этом случае кинетическая энергия движения судов гасится за счет разрушения надводных корпусных конструкций.

Теоретический анализ предлагаемого конструктивного решения выполнялся на основе следующего алгоритма оценки его эффективности для снижения последствий при столкновении судов.

Шаг 1. Формулируется условие достижения сечением предельного состояния с учетом продольной силы:

$$M/M_0 = \pm [1 - (P/P_0)^2], \quad (4)$$

где  $M(P)$  – изгибающий момент сечения балки;  $M_0(P)$  – предельный момент сечения балки;  $P$  – продольная сила;  $P_0$  – предельное значение продольной силы.

Шаг 2. Определяется величина предельной поперечной силы  $P_0$ :

$$P_0 = \frac{2M_0}{h} = \frac{\sigma_T b t^2}{2h}. \quad (5)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала,  $F=bt$  – площадь сечения балки,  $h$  – высота прямоугольного сечения.

Шаг 3. Корректируется величина предельной нагрузки, которую достигают все гофры одновременно. Предельная сила  $P_0$  для всей гофрированной оболочки бульба таранного типа будет равна:

$$P_o = \frac{\pi R \sigma_T t^2 b}{h}, \quad (6)$$

где  $R$  – радиус гофрированного элемента бульба.

Шаг 4. Устанавливается величина предельной продольной нагрузки бульба каплеобразного типа. В этом случае предельная сила  $P_0$  для всей гофрированной оболочки бульба определяется величиной предельной нагрузки самой жесткой гофры:

$$P_0 = \frac{t^2 b \sigma_T}{2h} \int_0^l \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx, \quad (7)$$

где  $P_0$  – предельная нагрузка на самую жесткую гофру;  $f(x)$  – функция, описывающая форму бульба в самом жестком сечении;  $h$  – высота гофры в этом сечении.

Проведенные экспериментальные исследования несущей способности гофрированных бульбов и подводной части бортового перекрытия подтвердили результаты теоретических расчетов. Та-

ким образом, анализ проблемы столкновения судов привел к поиску новых конструктивных решений, снижающих опасность последствий при обеспечении безопасности мореплавания. Реализация решения достигается за счет установки на судах бульбовых образований новой конструкции, позволяющей избежать подводных пробоин, уберечь судно от гибели и, следовательно, повысить безопасность эксплуатации судов промыслового флота.

Алгоритм контроля ситуации столкновения судов S(Crash) построен на основе концепции динамической модели катастроф, предусматривающей возникновение двух случаев взаимодействия:

$$S(\text{Crash}) \rightarrow S(\text{Stab}); \quad (8)$$

$$S(\text{Crash}) \rightarrow S(\text{Cat}), \quad (9)$$

где первый случай S(Stab) определяет условие сохранения прочности при соударении корпусов судов, а второй S(Cat) – потерю прочности при малой эффективности конструктивного решения.

### 3. Контроль эксплуатационной прочности при входе судна в ледовое поле

Одной из сложных ситуаций, исследуемых на основе динамической модели катастроф, является вход судна в ледовое поле с целью предотвращения возможности опрокидывания при интенсивном обледенении. Главный вопрос, который возникает в связи с этим результатом – это качество стабилизации при прохождении ледового поля, особенно в первые моменты встречи со льдом (своего рода «пограничный слой» поля, интервал между 10 и 20 сек.), когда скорость может превышать безопасную.

Анализ динамики судна при входе в ледовое поле базируется на учете следующих физических особенностей задачи. Основными факторами, определяющими динамику взаимодействия, являются толщина льда и начальная скорость судна. При функционировании ИС контроля эксплуатационной прочности судна при входе в ледовое поле генерируется последовательность значений толщины льда и его сплошности (от 10% до 100%, т.е. от 1 до 10 баллов). Моделирование осуществляется на основе нечеткой и нейронечеткой интерпретаций нейродинамической системы в рамках концепции мягких вычислений [12]. Результаты моделирования отображаются в виде текущих данных, матрицы нечеткого управления и нейросетевого предиктора [2],[7].

На рис. 2 приведены результаты нечеткого моделирования исследуемой ситуации. Справа на этом рисунке представлены: изменение толщины льда и ее приращения, значения скорости, вычисленные по нечетким правилам и по математической модели. Среди текущих данных отображаются средняя относительная и абсолютная скорость судна, а также толщина льда и ее изменение. На матрице управления отображается действующее на текущем шаге логическое пра-

вило, определяющее скорость в зависимости от толщины льда и ее изменения. В случае приближения графиков к правому краю выделенного поля, они начинают перемещаться влево, при этом всегда отображается последнее значение исследуемого параметра.

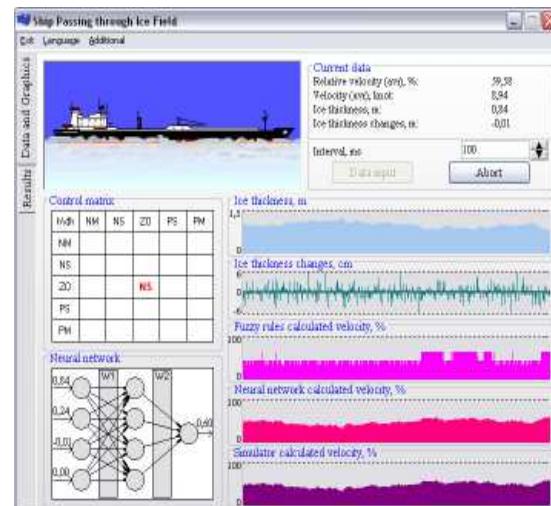


Рис. 2. Результаты моделирования при сплошном ледовом поле и толщине льда 1 м

Экран оператора дополнен принятой конфигурацией нейронной сети (нейросетевого предиктора), а динамические картины взаимодействия судна с ледовым полем – кривой изменения скорости судна на основе нейросетевой модели. Такая форма интерпретации результатов моделирования позволяет более наглядно представить поведение судна в сложных ситуациях, особенно при контроле динамических характеристик судна при движении в торосах. В реальных условиях эксплуатации рассмотренное графическое представление может быть использовано при организации интерфейса «Оператор – ИС» (рис. 2).

Одной из сложных задач анализа и интерпретации динамики взаимодействия судна с ледовым полем является оценка напряженно-деформируемого состояния корпусных конструкций в зоне контакта. Решение этой задачи при функционировании ИС осуществляется в рамках принципа конкуренции с использованием стандартного алгоритма, построенного на базе метода конечных элементов, и ИНС. В этой задаче нейронная сеть играет двоякую роль. С одной стороны, она используется как конкурирующая вычислительная технология, с другой – как эффективная процедура, обеспечивающая функционирование программного комплекса в режиме реального времени. Последнее особенно важно в сложных ситуациях, когда применение стандартного алгоритма не может обеспечить быструю обработку информации, поступающей от датчиков измерительной системы.

Экспериментальная проверка эффективности использования нейросетевого предиктора в рамках принципа конкуренции проведена путем обработки и сопоставления экспериментальных данных, полученных в результате физического

моделирования динамики взаимодействия на специально разработанном экспериментальном стенде [2],[7].

### Заключение

В результате проведенного исследования динамики взаимодействия при контроле эксплуатационной прочности при посадке судна на мель, столкновения судов и входе судна в ледовое поле:

- осуществлен синтез графоаналитической системы, обеспечивающей контроль движения судна на ограниченной акватории и возможности посадки на мель.

- разработано конструктивное решение проблемы столкновения судов и предложен алгоритм

контроля ситуации на основе данных измерений и методов математического моделирования.

– проведено нейродинамическое моделирование динамики входа судна в ледовое поле при различной сплошности льда, результаты которого использованы при построении функционального модуля ИС контроля эксплуатационной прочности промысловых судов.

Таким образом, на основе разработанной интеллектуальной технологии предложен подход и методология мониторинга динамики судна, позволяющая повысить эффективность использования промысловых судов в сложных условиях эксплуатации.

### Литература

1. Бортовые интеллектуальные системы. В 2 ч. Ч. 2. Корабельные системы.– М.: Радиотехника, 2006.
2. Бураковский, Е.П. Эксплуатационная прочность корпусов промысловых судов: Учеб. пособие / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев, В.П. Прохнич.– СПб.: Арт-Экспресс, 2012.
3. Бураковский, Е.П. Графоаналитическая система контроля эксплуатационной прочности судов промыслового флота на основе современной теории катастроф] / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев, В.П. Прохнич // Морские интеллектуальные технологии. 2014. №1(23). Т. 2. С. 15–21.
4. Кронновер, Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах.– М.: Постмаркет, 2000.
5. Лазарев, В.Л. Эволюция систем контроля и управления с позиций информационно-энтропийной теории // Сборник докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям SCM'2005. В 2 т. Т. 1.– СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С.33–41.
6. Майника, Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах.– М.: Мир, 1981.
7. Нейрокомпьютерные системы в интеллектуальных технологиях XXI века / Под ред. Ю.И. Нечаева.– М.: Радиотехника, 2012.
8. Нечаев, Ю.И. Математическое моделирование в бортовых интеллектуальных системах реального времени // Труды 5-й всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика – 2003».– М.: МИФИ, 2003.
9. Нечаев, Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений.– СПб.: Арт-Экспресс, 2011.
10. Семенов, А.С. Моделирование самоорганизующихся процессов развития: фрактально-ориентированный подход.– М.: Изд-во МАИ, 2013.
11. Системы искусственного интеллекта в интеллектуальных технологиях XXI века / Под ред. Ю.И. Нечаева.– СПб.: Арт-Экспресс, 2011.
12. Zadeh, L. Fuzzy logic, neural networks and soft computing // Commutation on the ASM. 1994. Vol. 37. № 3. P. 77–84.

### References

1. Bortovye intellektual'nye sistemy. V 2 ch. Ch. 2. Korabel'nye sistemy. M.: Radiotekhnika, 2006.
2. Burakovskij E.P. Jekspluatacionnaja proch-nost' korpusov promyslovyh sudov: Ucheb. Posobie. E.P. Burakovskij, P.E. Burakovskij, Ju.I. Nechaev, V.P. Prohnich. SPb.: Art-Jekspress, 2012.
3. Burakovskij E.P. Grafoanaliticheskaja sis-tema kontrolja jekspluatacionnoj prochnosti su-dov promyslovogo flota na osnove sovremennoj teorii katastrof. E.P. Burakovskij, P.E. Burakovskij, Ju.I. Nechaev, V.P. Prohnich. Morskie intellektual'nye tehnologii. 2014. № 1(23).T. 2. S.15–21.
4. Kronnove R.M. Fraktaly i haos v dinami-cheskih sistemah. M.: Postmarket, 2000.
5. Lazarev V.L. Jevoljucija sistem kontrolja i upravlenija s pozicij informacionno-jentropijnoj teorii. Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj konferencii po mjagkim vychislenijam i izmerenijam SCM'2005. V 2 t. T. 1. SPb.: izd-vo SPbGJeTU «LJeTi». S. 33–41.
6. Majnika Je. Algoritmy optimizacii na se-tjah i grafah. M.: Mir, 1981.
7. Nejrokomp'juternye sistemy v intellek-tual'nyh tehnologijah HHI veka. Pod red. Ju.I. Nечаева. M.: Radiotekhnika, 2012.
8. Nechaev Ju.I. Matematicheskoe modelirova-nie v bortovyh intellektual'nyh sistemah re-al'nogo vremeni. Trudy 5-j vserossijskoj nauchno-tehnicheskoj konferen-cii «Nejroinformatika – 2003». M.: MIFI, 2003.
9. Nechae, Ju.I. Teoriya katastrof: sovremen-nyj podhod pri prinjatii reshenij. SPb.: Art-Jekspress, 2011.
10. Semenov A.S. Modelirovanie samoorga-nizujushhihsja processov razvitiya: fraktoidno-orientirovannyj podhod. M.: izd-vo MAI, 2013.
11. Sistemy iskusstvennogo intellekta v intellektual'nyh tehnologijah XXI veka. Pod red. Ju.I. Nechaeva. SPb.: Art-Jekspress, 2011.
12. Zadeh, L. Fuzzy logic, neural networks and soft computing. Commutation on the ASM. 1994. Vol. 37. № 3. P. 77–84.



**Научный журнал**  
**МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**  
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 – инструкция прилагается ниже
3. Отдельный файл (для публикации в журнале и отправки в систему Российского индекса научного цитирования) – инструкция прилагается ниже
4. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) могут быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу [mit-journal@mail.ru](mailto:mit-journal@mail.ru) (по этому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

По желанию авторов, документ 1 в бумажной версии и компакт-диск с документами 2 и 3 могут быть либо присланы по почте в адрес редакции, либо доставлены непосредственно в редакцию, либо переданы одному из членов редколлегии. Оригинал акта экспертизы должен быть либо прислан по почте в адрес редакции, либо доставлен непосредственно в редакцию, либо переданы одному из членов редколлегии.

**На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.**

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом может быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала. Журнал публикуется в цветном варианте.

**Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.**

**Стоимость публикации 6500 рублей по выставляемому 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 ИНТЕЛЛЕКТАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"  
д.т.н. проф. Никитин Н.В.**

УДК 629.12.001.2

## ИНСТРУКЦИЯ ПО ПОДГОТОВКЕ СТАТЕЙ для научного журнала "МОРские ИНтеллектуальные ТЕХнологии"

**Николай Васильевич Никитин**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования судов  
 Санкт-Петербургского государственного морского технического университета  
 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3  
 тел. (812) 513-04-51 e-mail: morintex\_spb@mail.ru

### АННОТАЦИЯ

В работе предлагаются правила оформления статей для научного журнала «Морские интеллектуальные технологии» в текстовом процессоре MS Word 97-2003 по требованиям для публикации в научном журнале ВАК, а также международных реферативных баз данных Scopus и Web of Science. Инструкция представляет собой специальную заготовку, которая служит базисом для создания конкретной статьи.

Аннотация предоставляется авторами в расширенном виде. Объем: не менее 950 и не более 1800 знаков (с пробелами), то есть 100-250 слов. В аннотации должны быть четко определены цель работы, ее новизна, представлены основные выводы. Языки – русский и английский.

Типичная структура аннотации: состояние вопроса; материалы и/или методы исследования, результаты; заключение.

Методы в аннотации только называются. Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдаётся предпочтение новым результатам и выводам, которые, по мнению автора статьи, имеют практическое значение. Следует указать пределы точности и надёжности данных, а также степень их обоснования. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.

**Ключевые слова:** Список ключевых слов должен характеризовать предметную область исследования. Недопустимо использование терминов общего характера (например, проблема, решение), не являющихся специфической характеристикой публикации. Количество ключевых слов должно быть 8–10.

## GUIDELINES FOR PREPARATION OF ARTICLES FOR THE ACADEMIC PERIODICAL «MARINE INTELLECYUAL TECHNOLOGIES»

**Nikitin Nikolay Vasilevich**

the professor, Dr.Sci.Tech., the professor of DEPARTMENT OF SHIP DESIGN,  
 STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG  
 Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation  
 tel: +7 (812) 513-04-51 e-mail: morintex\_spb @mail.ru

### ABSTRACT

The paper suggests rules for formatting articles to be submitted for the "Maritime Smart Technologies" academic periodical in the MS Word Processor 97-2003 according to the requirements set out for publication in an academic periodical of the State Commission for Academic Degrees and Titles as well as in the international Scopus and Web of Science bibliographic databases. The guidelines represent a special template which serves as a basis for creation of a certain article.

The authors should submit an extended abstract. The abstract should contain minimum 950 and maximum 1800 characters (including spaces), i. e. 100–250 words. The abstract must cover the objective and novelty of the paper and reflect the main conclusions. The languages of the abstract should be Russian and English.

The standard structure of an abstract is as follows: the state-of-the-art summary; data for study and/or research techniques; findings; conclusion.

The techniques should only be mentioned in the abstract. The findings should be described as accurately and informatively as possible. The major theoretical and experimental results, actual data, discovered interrelations and common factors should be reflected. Still new results and conclusions which, from the author's point of view, are of practical importance are put above. The data accuracy and reliability limits as well as the degree of their verification should be indicated. The conclusions can be accompanied by recommendations, estimations, suggestions described in the article.

**Key words:** The list of key words must be specific for the subject field of the investigation. General terms (e. g. problem, solution) which are not specific for this publication are inadmissible. The key words should amount to 8–10.

## Введение

При подготовке статей у авторов нередко возникают трудности, связанные с необходимостью жестко выдерживать требуемые форматы подготовки текстов.

Вместе с тем, в современных текстовых процессорах существуют развитые средства поддержки общезначимых и специализированных шаблонов, автоматизирующих эту деятельность. Учитывая вышесказанное, автор данной инструкции подготовил специализированный шаблон создания camera ready текстов статей, представляемых в редакцию.

Данная инструкция не обычный текст, а заготовка, которую авторы работ, представляемых в журнал, должны редактировать для получения качественных текстов статей.

**Обращаясь к авторам, редакция журнала доводит до их сведения требования к оформлению статей. Суть их сводится к тому, что, с одной стороны, предоставленная авторами информация должна быть интересной и понятной международному научному сообществу без обращения к полному тексту статьи, а с другой – должны быть обеспечены возможности контекстного поиска и аналитической обработки данных.**

Фамилии авторов должны быть транслитерированы, или указаны так же, как в ранее опубликованных в зарубежных журналах статьях. Должны быть представлены адресные сведения о месте работы авторов, должность, учченая степень и ученое звание.

Название организации переводится на английский язык без составных частей названий организаций, обозначающих принадлежность ведомству, форму собственности, статус организации с указанием полного юридического адреса в следующей последовательности: улица, дом, город, индекс, страна. Наиболее полный список названий учреждений и их официальной англоязычной версии можно найти на сайте НЭБ eLibrary.ru. Название статьи, ключевые слова и аннотация также переводятся на английский язык. Все переводы должны быть высококачественными.

**Название статьи** должно быть информативным, можно использовать только общепринятые в международном научном общении сокращения. В переводе названия недопустимы транслитерации с русского языка, кроме непереводимых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также непереводимый сленг,

известный только русскоговорящим специалистам. Англоязычное название должно быть грамотно с точки зрения английского языка, при этом по смыслу полностью соответствовать русскоязычному названию.

Обращаем внимание авторов на необходимость обеспечить высокое профессиональное качество перевода на английский язык. Автоматизированный перевод с помощью программных систем категорически запрещается! При обнаружении экспертом Редакции низкого качества перевода статья отклоняется!

Возможности систем SCOPUS и Web of Science позволяют проводить исследования: по ссылкам, оценивать значение и признание работ конкретных авторов, научный уровень журналов, организаций и стран в целом, определять актуальность научных направлений и проблем, выявлять их точки роста и падения и т.д. Ссылка на публикацию в научной статье является одним из главных показателей качества публикации. А статья с представительным списком литературы демонстрирует профессиональный кругозор и качественный уровень исследований ее авторов

Полный текст должен быть структурированным по разделам. Структура полного текста рукописи, посвященной описанию результатов оригинальных исследований, должна соответствовать общепринятым шаблону и содержать разделы: введение (актуальность), цель и задачи, материалы и методы, результаты, выводы, обсуждение (дискуссия).

## 1. Инсталляция заготовки Mor-Inst

Вы получили по электронной почте (или некоторым другим способом) файл **Mor-Inst.doc** и должны использовать его на своем текстовом процессоре MS Word 97-2003.

Для того, чтобы начать работу необходимо скопировать на Ваш компьютер файл **Mor-Inst.doc**, переименовав его под фамилией первого автора (например, **nikitin.doc**).

После выполнения этих действий Ваш текстовый процессор MS Word 97-2003 готов для создания документа в формате camera ready для оформления номера.

## 2. Начало работы с заготовкой Mor-Inst

Итак, предположим, что Вы скопировали заготовку **Mor-Inst.doc** для своего текстового процессора MS Word 97-2003, как это определено в предыдущем разделе данной инструкции.

Теперь, после вызова текстового процессора MS Word 97-2003, из опции основного меню **File**

**(Файл)** выбирайте подопцию **Open (Открыть)**, а на приглашение выбрать файл отметьте **nikitin.doc** и нажмите клавишу **OK**.

После этого Ваш текстовый процессор откроет документ с данной заготовкой, который существенно облегчит Вашу дальнейшую работу.

Дальнейшая подготовка статьи очень похожа на редактирование “чужого” текста и преобразование его к виду, когда он станет Вашим.

В оставшейся части настоящей инструкции последовательно обсуждаются все основные элементы, которые могут потребоваться при подготовке Вашей статьи.

Обратите внимание на то, что сами элементы заготовки уже выбраны таким образом, чтобы Ваша будущая статья удовлетворяла всем требованиям оформления camera ready текстов для публикации в журнале.

### 3. Основные правила подготовки статей на базе шаблона Mor-Inst

#### 4.1. Общие замечания по объему и формату статьи

По решению редакции объемы принимаемых к публикации материалов должны отвечать следующим ограничениям

- объем статьи должен быть не более 5 стр.;
- текст доклада должен укладываться в целое число страниц.

Все материалы должны быть сформированы для последующей печати на стандартных листах формата А4 со следующим **Layout (Параметрами страницы)** (рис. 1).

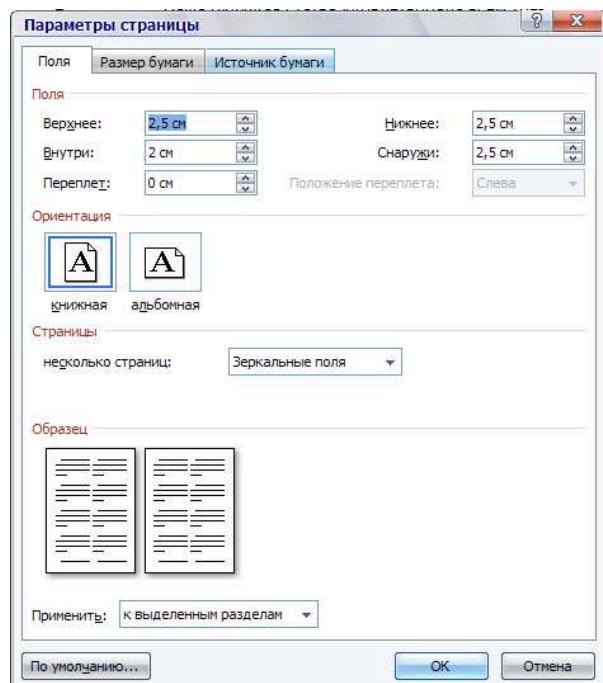


Рис. 1. Общий Layout страницы

Основной текст набирается в **2 колонки**, промежуток между колонками **0,7 мм**; ширина колонки **7,9 мм**.

**Нумерация страниц** подготавливаемой работы не производится.

Каждая статья должна быть организована следующим образом (данний sampler сам является примером нужной организации текста статьи):

– УДК.

– Заголовок работы.

– Имя (полностью), Отчество (полностью), Фамилия (полностью).

– Ученое звание и ученая степень (полностью).

– Должность, организация.

– Адрес автора (телефон и электронный адрес, если имеется).

– Если авторов несколько, их фамилии упорядочиваются по алфавиту.

– Аннотация работы (не менее 950 и не более 1800 знаков (с пробелами), то есть 100-250 слов).

– Ключевые слова (8–10).

– Разделы и подразделы основного текста (нумерация сквозная арабскими цифрами у разделов и номер раздела + нумерация сквозная арабскими цифрами у данного подраздела; номер раздела и номер подраздела отделяются друг от друга точкой; после номера раздела (подраздела) ставится точка, а название раздела (подраздела) начинается с заглавной буквы, после заголовков точка не ставится).

– В конце работы (перед списком литературы) может быть ненумерованный раздел **Благодарности**, где, как правило, указываются спонсоры (например, номер гранта РФФИ) данной работы.

– Список использованных источников, собранных в ненумерованном разделе **Литература**

– После списка литературы размещается список литературы в романском алфавите в ненумерованном разделе **References**

– Все заголовки разделов и подразделов центрируются.

– Ссылки на литературу в тексте работы заключаются в квадратные скобки и даются сквозной нумерацией арабскими цифрами.

**Заголовок работы, ФИО, ученое звание, ученая степень, должность, организация, адрес авторов (телефон и электронный адрес, если имеется), аннотация работы и ключевые слова публикуются на русском и английском языках.**

#### 4.2. Шрифты, используемые при подготовке статьи

Все шрифты, используемые при подготовке статьи, выбираются из набора **Arial**. Если Вы пользуетесь данным sampler’ом, все размеры будут выставлены правильно и Вам останется только следовать им. Если же Вы пользуетесь твердой копией данного sampler’а, то используйте следующие размеры шрифтов:

- для названия статьи **Arial 13 прописной, жирный;**
- для УДК **Arial 9 курсив;**
- для ФИО автора (ов), адреса (ов) автора (ов) статьи **Arial 11 прямой;**
- для аннотации **Arial 9, границы текста +10 мм слева и -10 мм справа;**
- для текста статьи **Arial 9,5, абзацный отступ 5 мм;**
- для заголовка Литература **Arial 10,5, жирный, по центру, интервал сверху 12 пт, снизу 4 пт, абзацный отступ 0;**
- для заголовков разделов статьи **Arial 10,5, жирный по центру, интервал сверху 12 пт, снизу 4 пт, абзацный отступ 0;**
- для заголовков подразделов статьи **Arial 9,5, курсив по центру, интервал сверху 12 пт, снизу 4 пт, абзацный отступ 0;**
- для подрисуночных подписей **Arial 8,5, курсив, по центру, интервал сверху 4 пт, снизу 9,5 пт, абзацный отступ 0;**
- для подстраничных ссылок **Arial 8,5, абзацный отступ 0,5.**

#### 4.3. Использование графического материала

В работе допускается использование рисунков, схем, экранных форм и др. графических материалов (обратите внимание на то, чтобы рисунки сохранялись как **цветные или черно-белые картинки**) как **внедренных объектов<sup>1</sup>**. Каждое графическое изображение должно представлять собой **единий, цельный объект**.

По возможности используйте для графического материала минимально требуемое разрешение. Это существенно уменьшает объем пересылаемого материала.

Во всех случаях обращайте внимание на то, чтобы текстовые подписи на рисунках были набраны с использованием тех же шрифтов, что и основной текст и меньшим размером.

#### 4.4. Использование таблиц

В работе допускается использование таблиц, подготовленных стандартными средствами MS Word 97-2003 . В качестве примера ниже дается представление таблицы, подготовленной с помощью этих средств (табл. 1).

Таблица набирается меньшим кеглем.

Слово таблица **Arial 8,5, курсив, вправо, абзацный отступ 0.**

Название таблицы **Arial 8,5, жирный, по центру, интервал снизу 4 пт, абзацный отступ 0.**

Текст в таблице **Arial 8,5.**

Таблица 1  
Пример таблицы

N/N	Колонка-1	Колонка-2	Колонка-3	Колонка-4
1.	фффф	ыыыы	111	МММ
2.	фффф	ыыыы	111	МММ
3.	фффф	ыыыы	111	МММ
4.	фффф	ыыыы	111	МММ

Перед и после таблицы одна пустая строка основного текста.

**ФОРМУЛЫ И РИСУНКИ НЕ РАЗМЕЩАТЬ В ТАБЛИЦЕ!!!**

#### 4.5. Использование формул

В работе допускается использование формул любой сложности, поддерживаемых компонентой MS Equation.

Если формула появляется в тексте как отдельная строка, она должна быть центрирована и, при необходимости, помечена сквозной нумерацией арабскими цифрами в круглых скобках. Если формула появляется внутри текста, обращайте внимание на размеры используемых шрифтов, чтобы они были «состыкованы» с размерами текста работы.

Ниже приводятся примеры формул в тексте и в отдельной строке.

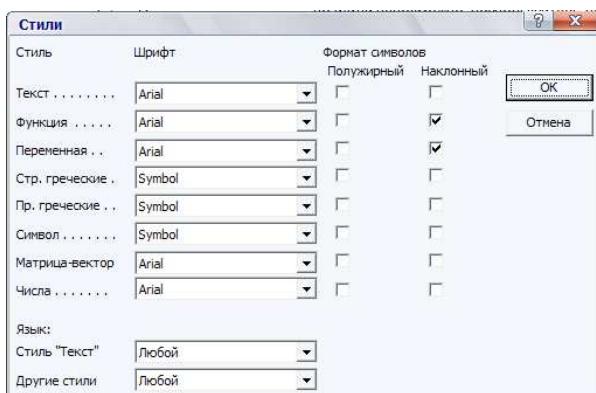
Данный пример иллюстрирует использование формулы в тексте  $\sum_{n=1}^{n=K} X_n^k \cdot 1,25$ . Здесь при подготовке формулы использованы установки шрифтов by default (по умолчанию). По возможности, пользуйтесь этим способом для подготовки не только формул в тексте статьи, но формул в отдельной строке (1).

$$\forall x \in [a, b] F(x) \leq \sigma \quad (1)$$

Все формулы набираются тем же шрифтом, что и основной текст.

**ФОРМУЛЫ НЕ СОХРАНЯТЬ КАК РИСУНОК!!!**

Если же это, по каким-либо причинам неудобно и/или невозможно, воспользуйтесь установками, приведенными на рис. 2.



<sup>1</sup> Статьи с рисунками, нарисованными в тексте документа с помощью панели "Рисование" MS Word 97-2003, рассматриваются редакцией в индивидуальном порядке по согласованию с авторами статей.

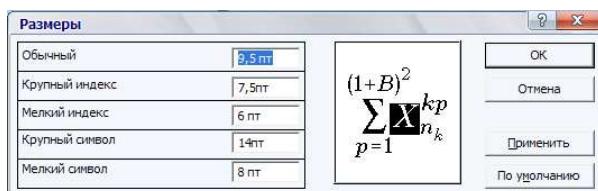


Рис. 2. Установки шрифтов и размеров в MS Equation

Обратите внимание на то, что при наборе формул в тексте, возможно изменение «интервалности». Не бойтесь этого и не пытайтесь уменьшить размер используемого шрифта до нечитаемого уровня. Аналогичное

замечание справедливо и для формул, расположенных в отдельной строке.

#### 4.6. Размещение элементов текста на две колонки

Если таблицы, формулы, рисунки превышают размер одной колонки, то их размещают на **полный формат** (на 2 две колонки).

При этом сохраняются все требования по шрифтам и размерам к этим элементам, когда они набраны на формат одной колонки.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ РАЗМЕЩАЕМ НА ПОЛНЫЙ ФОРМАТ.**

Таблица 2

Пример таблицы на полный формат

N/N	Колонка-1	Колонка-2	Колонка-3	Колонка-4	Колонка-5
1.	фффф	ыыыы	111	МММ	ТТТТ
2.	фффф	ыыыы	111	МММ	ТТТТ
3.	фффф	ыыыы	111	МММ	ТТТТ
4.	ффfff	ыыыы	111	МММ	ТТТТ

Пример формулы на полный формат:

$$N_y(t) = \frac{Eh}{1-\mu^2} \left[ \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{w}{R} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} \right] = \frac{Eh}{1-\mu^2} \xi(t). \quad (2)$$

Пример рисунка на полный формат:

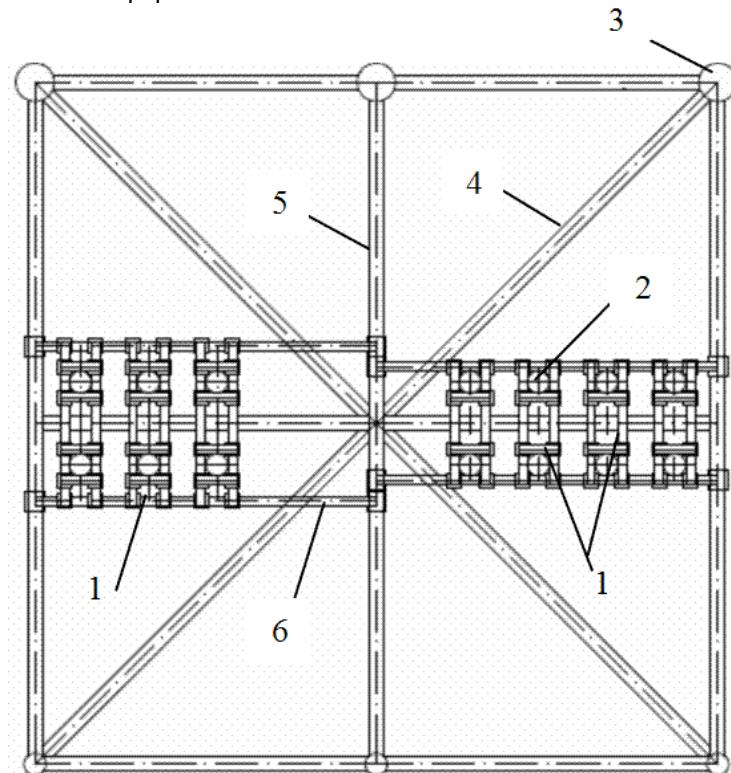


Рис. 3. Раскрепление водоотделяющих колонн с помощью жестких рам (вид на плане на диафрагму МСП):  
1 – жесткие рамы; 2 – водоотделяющие колонны; 3 – вертикальные стойки опорного блока; 4 – раскосы опорного блока; 5 – распорка опорного блока; 6 – фундамент жесткой рамы

## 5. Заключительные замечания

Автор данной инструкции руководствовался единственной целью – уменьшить авторам сложность подготовки статей для журнала.

### Благодарности

Авторы могут выразить благодарности людям и организациям, способствовавшим публикации статьи в журнале, но не являющимся её авторами

Информация о спонсорстве. Необходимо указывать источник финансирования как научной работы, так и процесса публикации статьи (фонд, коммерческая или государственная организация и др.). Указывать размер финансирования не требуется.

## Литература

В библиографии (пристатьевом списке литературы) каждый источник следует помещать с новой строки под порядковым номером. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТ Р 7.05-2008.

## References

Список литературы на русском языке должен быть представлен и в романском алфавите (латинице), то есть, транслитерирован, (транслитерация – это побуквенная передача текста, написанного с помощью русского алфавита, средствами латинского алфавита), список литературы на других языках должен быть приведен на языке оригинала.

Вся транслитерация списка литературы должна быть выполнена в соответствии с системой Госдепартамента США, которая в настоящее время является наиболее распространенной.

Автоматизировать процесс транслитерации можно, воспользовавшись программным обеспечением, которое доступно по адресу [www.translit.ru](http://www.translit.ru) (в раскрывающемся списке «Варианты» выбираем вариант BGN).

**Транслитерированная литература должна быть сформирована следующим образом:**

Структура библиографической ссылки на статью:

Author, A. A., Author, B. B., & Author, C. C. (2005).

Title of article. Title of Journal, 10(2), 49-53.

### Материалы конференций:

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalin I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi" (Proc. 6th Int. Technol. Symp. "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact"). Moscow, 2007, pp. 267-272.

### Книги (монографии, сборники, материалы конференций в целом):

Belya kniga po nanotekhnologiyam: issledovaniya v oblasti nanochastits, nanostruktur i nanokompositov v Rossiiskoi Federatsii (po materialam Pervogo Vserossiiskogo soveshchaniya uchenykh, inzhenerov i proizvoditelei v oblasti nanotekhnologii [White Book in Nanotechnologies: Studies in the Field of Nanoparticles, Nanostructures and Nanocomposites in the Russian Federation: Proceedings of the First All-Russian Conference of Scientists, Engineers and Manufacturers in the Field of Nanotechnology]. Moscow, LKI, 2007. Nenashev M.F. Poslednee pravitel'stvo SSSR [Last government of the USSR]. Moscow, Krom Publ., 1993. 221 p.

From disaster to rebirth: the causes and consequences of the destruction of the Soviet Union [Ot katastrofy k vozrozhdeniju: prichiny i posledstvija razrushenija SSSR]. Moscow, HSE Publ., 1999. 381 p.

Kanevskaya R.D. Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov razrabotki mestorozhdenii uglevodorodov (Mathematical modeling of hydrodynamic processes of hydrocarbon deposit development). Izhevsk, 2002. 140 p.

Latyshev, V.N., Tribologiya rezaniya. Kn. 1: Friktsionnye

**Ни в одном из зарубежных стандартов на библиографические записи не используются разделительные знаки, применяемые в российском ГОСТе («//» и «—»). Название источника и выходные данные отделяются от авторов и заглавия статьи типом шрифта, чаще всего, курсивом (*italics*), точкой или запятой.**

**Файл для отправки в систему Российского индекса научного цитирования****УДК 629.12.001.2****Авторы****(Сведения об авторах: фамилия, имя, отчество автора (авторов) полностью, место работы каждого автора, контактная информация (e-mail) для каждого автора)**

ФИО Никитин Николай Васильевич,

Уч. ст,уч. зв. профессор, доктор технических наук,

Должность заместитель генерального директора

Организация НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

**Координаты для публикации в журнале**

e-mail: morintex\_spb@mail.ru      tel: (812) 513-04-51

**Название статьи****Метод топологического проектирования общего расположения****Аннотация**

В основе метода положена идея, которая заключается в том, что при проектировании общего расположения происходит последовательный синтез варианта общего расположения, который строится на основе определенной концепции размещения и заключается в последовательном наращивании пространственной структуры корабля с оценкой получающихся частичных решений. Для этого выделены два этапа – определение качественных решений архитектурного облика корабля в виде грубого эскиза и определение количественных характеристик общего расположения. Для решения этих задач предложены пути формализации описания и применения их.

**Ключевые слова**

общее расположение, грубый эскиз, пространственная структура корабля

**Authors**Nikitin Nikolay Vasilevich,  
the professor, Dr.Sci.Tech.,  
the vice-director

RESEARCH CENTRE «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES» Ltd.

3, Lotsmanskaya Str., St.Petersburg, 190121 Russia

e-mail: morintex\_spb@mail.ru      tel: (812) 513-04-51

**Article name****Topological design method for the general layout****Abstract**

This method is based on the idea that designing of the general layout involves a sequential synthesis of the general layout option, which is built up on a certain arrangement concept and which consists in step-by-step extension of the ship's spatial pattern with evaluation of resulting partial solutions. Two stages are determined for this purpose – determination of qualitative solutions for the ship's architectural appearance in the form of a primal sketch, and determination of the general layout quantitative characteristics. To solve these problems, this publication suggests techniques for formalizing their description and application.

**Key words**

general layout, primal sketch, ship's spatial pattern.

## Шаблон для сопроводительного письма авторов

В редакцию журнала  
" МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ "  
190008 г.

Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д. 3

### СОПРОВОДИТЕЛЬНОЕ ПИСЬМО

Просим опубликовать в журнале " МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ " статью  
<заголовок статьи>.

Авторами статьи являются <перечень Ф.И.О. авторов полностью>.

Работа выполнена в <полное и сокращенное название учреждения (учреждений)>.

Текущую переписку по вопросам публикации статьи следует вести с <Фамилия И.О.>.

Координаты для обратной связи:

1. Почтовый адрес (с индексом)
2. E-mail
3. Тел. служебный и домашний (с кодом города)

Авторы согласны с тем, что редакция имеет право на литературное редактирование и доведение статьи до редакторских стандартов, принятых в рамках журнала.

Подпись

<Дата>

## Шаблон рецензии

В редакцию журнала  
" МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ "  
190008 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д. 3

### РЕЦЕНЗИЯ

Статья: <Заголовок статьи>  
Статья:<Фамилии И.О. авторов>

#### I. Информация для редакции

1. Соответствие статьи тематике журнала:
  - статья соответствует тематике журнала (да/нет)
  - если нет, то какие альтернативные журналы могут быть предложены авторам для рассмотрения?
2. Оригинальность и значимость результатов статьи (да/нет/другие оценки):
  - результаты оригинальны
  - результаты имеют научную значимость
  - результаты имеют практическую значимость
3. Качество изложения материала статьи (да/нет/другие оценки):
  - является ли аннотация достаточно информативной
  - понятность изложения статьи
  - следует ли сократить размер статьи
  - ясно ли указана цель статьи
  - адекватно ли определено место статьи в круге других работ
  - можно ли понизить степень подробности математических выкладок
  - адекватен ли список цитированной литературы
  - все ли рисунки и таблицы уместны
  - имеются ли ошибки и технические погрешности
  - строгость изложения математических и экспериментальных результатов
  - достаточно ли обоснованы результаты и выводы статьи
4. Заключение (да/нет)
  - статья может быть принята для публикации без доработки
  - статья требует доработки и повторного рецензирования
  - статья не может быть принята для публикации
  - статью следует передать другому специалисту на рецензирование
5. Замечания и рекомендации по статье для членов редколлегии

Должность, ученое звание и научная степень

<Дата>

<Подпись рецензента>

#### II. Замечания и рекомендации по статье для авторов

**Есть на складе издательства****Гайкович А. И.****Основы теории проектирования сложных технических систем  
СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.**

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.

Есть в продаже: цена 420 руб. + пересылка

**Коршунов Ю. Л.****Люди, корабли, оружие (К 70-летию 1-го ЦНИИ МО РФ)  
СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 176 стр.**

Книга содержит историю научно-исследовательских институтов кораблестроения и морского оружия. Автор приводит большое количество фактов, характеризующих деятельность институтов на различных этапах развития флота.

Есть в продаже: цена 280 руб. + пересылка

**Архипов А. В., Рыбников Н. И.****Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов  
СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.**

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.

Есть в продаже: цена 320 руб. + пересылка

**Караев Р. Н., Разуваев В. Н., Фрумен А. И.****Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений.****Учебник для вузов****СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.**

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.

Есть в продаже: цена 1500 руб. + пересылка

**Шауб П. А.****Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения****СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.**

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.

Есть в продаже: цена 350 руб. + пересылка

**Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей****СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.**

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.

Есть в продаже: цена 250 руб. + пересылка