MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

№ 2 (32) Т.1 2016

СПбГМТУ

Труды

Санкт-Петербургского государственного морского технического университета

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 2 (32) Т.1 2016 www.morintex.ru ISSN 2073-7173

Тематика: **кораблестроение, информатика, вычислительная техника и управление**

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

Редакционный Совет

Сопредседатели
И.Г.Захаров, д.т.н., профессор, заместитель генерального директора ЦМКБ «Алмаз»
Е.М. Апполонов, д.т.н., профессор, Ректор, СПбГМТУ

Члены Совета
А.И. Гайкович, д.т.н., профессор, генеральный директор, НИЦ "МОРИНТЕХ»
Г.Н. Муру, к.т.н., генеральный директор, 51 ЦКТИ судоремонта
Одд М. Фалтинсен, профессор, Норвежский университет науки и технологии, Норвегия
Пентти Куяла, профессор, университет Аалто, Финляндия
В.Н. Половинкин, д.т.н., профессор, референт генерального директора, ФГУП «КРЫЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР»
К.В. Рождественский, д.т.н., профессор, проректор по международному сотрудничеству, СПбГМТУ
С.П. Столяров, д.т.н., профессор, декан факультета корабельной энергетики и автоматики, СПбГМТУ
В.Н. Тряскин, д.т.н., профессор, проректор, СПбГМТУ по учебной работе
А.К. Филимонов, д.т.н., профессор, проректор СПбГМТУ по научной работе

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора
А.И. Гайкович, д.т.н., профессор, 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
Ю.А. Власов, к.ф-м.н. преподаватель, Флоридский Международный Университет, Майами, США
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

Периодичность издания — 4 номера в год
Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) http://vak.ed.gov.ru
Рукописи представляются в редакцию в электронном виде (на диске или по электронной почте: mit-journal@mail.ru)
Учредитель - издатель: Общество с ограниченной ответственностью «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-32382 от 09.06.2008
Редакция в обязательном порядке осуществляет экспертную оценку всех материалов, публикуемых в журнале

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

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

Перепечатка допускается только с разрешения редакции

Мнение редакционного совета и членов редколлегии может не совпадать с точкой зрения авторов публикаций

Редакционная этика журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Редакционная деятельность научного журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» опирается, в частности, на рекомендации Комитета по этике научных публикаций (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»

Дизайн: А.В. Антонов

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 2 (32) V.1 2016 www.morintex.ru ISSN 2073-7173

Subject: shipbuilding, computer science, computer engineering and management

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

Editorial Board
Co-chairmen
I.G. Zakharov, Doctor of Engineering, Professor, Vice-CEO ZMKB "Almaz"
E.M. Appolonov, Doctor of Engineering, Professor, Rector, Saint-Petersburg State Marine Technical University
Council Members

A.I. Gajkovich, Doctor of Engineering, Professor, CEO, Research Centre "Marine Intelligent Technologies"
G.N. Muru, PhD, CEO, 51 CCIS
Odd M. Faltinsen, Professor, Norwegian University of Science and Technology, Norway
Pentti Kujala, Professor, Aalto University, Finland
V.N. Polovinkin, Doctor of Engineering, Professor, Assistant Director General, Krylov State Research Centre
K.V. Rozhdestvenskij, Doctor of Engineering, Professor, Vice-Rector for International Science & Education, Saint-Petersburg State Marine Technical University
S.P. Stoljarov, Doctor of Engineering, Professor, Dean of the Faculty of naval power and automation, Saint-Petersburg State Marine Technical University
V.N. Trjaskin, Doctor of Engineering, Professor, Vice-Rector for Education, Saint-Petersburg State Marine Technical University
A.K. Filimonov, Doctor of Engineering, Professor, Vice-Rector for Research, Saint-Petersburg State Marine Technical University

Editorial Staff
Deputy Chief Editors
A. I. Gaykovich, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
A. I. Frumen, PhD, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
P. A. Shaub, Doctor of Engineering, Professor, Institute of Shipbuilding and armaments of Russian Navy
Members of Editorial Staff
A.V. Alekseev, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
A. E. Bogdanov, PhD, JSC "Control Systems"
R. V Borisov, Doctor of Engineering, Professor St. Petersburg State Marine Technical University
Yu. A. Vlasov, PhD, Adjunct Professor, Florida International University, Miami, FL, USA
A.N. Dyadik, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
V. A. Evteev, Doctor of Engineering, United Shipbuilding Corporation
Yu. I. Nechayev, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University
V. V. Rodionov, PhD, Senior Research Scientist, CJSC "Sea Project"
D. A. Skorokhodov, Doctor of Engineering, Professor, Institute of Transportation Problems of the Russian Academy of Science
O. V. Tretyakov, Doctor of Engineering, Associate Professor, Institute of Shipbuilding and armaments of Russian Navy
N. A Taranukha, Doctor of Engineering, Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University

Publication frequency — 4 issues per year
The journal is included into the system of Russian Science Citation Index http://vak.ed.gov.ru
Manuscripts are to be submitted to the editorial office in electronic form (on CD or via E-mail: mit-journal@mail.ru)
Founder-Publisher: Research Centre "Marine Intelligent Technologies", LLC

Registration Certificate: ПИ № ФС77-32382 of 09.06.2008
Address: Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190121, Russian Federation
Phone/fax +7 (812) 513-04-51
e-mail: mit-journal@mail.ru

The journal is included into the list of periodicals recommended for publishing doctoral research results http://vak.ed.gov.ru
Printed in the Printing-House of Research Centre "Marine Intelligent Technologies", LLC

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 office.

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

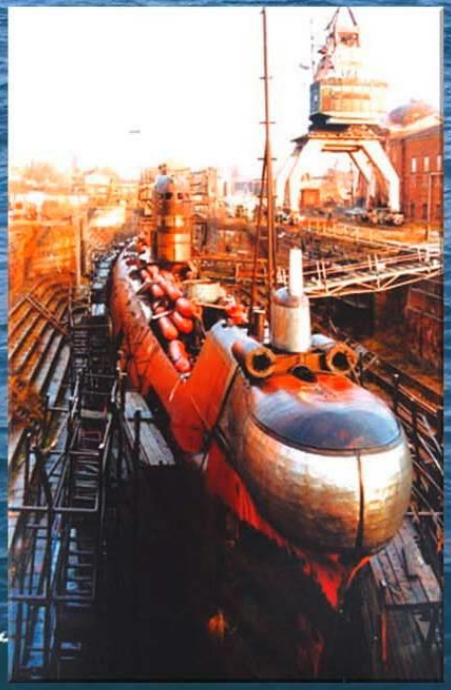
Editorial ethics of the scientific journal «MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES»

EDITORIAL BOARD of the Scientific Journal «Marine Intellectual Technologies» bases its work, in particular, on the guidelines of the Committee of Publication Ethics, as well as on the practices of influential international journals and publishers.
http://morintex.ru/en/nauchnyj-zhurnal/redakcionnaya-etika/

Design: A.V. Antonov

ТРУДЫ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО МОРСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

51 ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СУДОРЕМОНТА



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

51 ЦКТИС - ГОЛОВНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ВМФ РФ ПО РАЗРАБОТКЕ ТИПОВОЙ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ РЕМОНТНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

51 ЦКТИС

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

СОДЕРЖАНИЕ

стр

О журнале …….. 7

Теория корабля и строительная механика

Манухин В. А., Тряскин В.Н. Сравнительный анализ расчетов предельной прочности танкеров и навалочных судов …… 9

Рождественский К. В. К задаче о динамике кавитационного пузырька вблизи закругленной носовой части крылового профиля …… 14

Манухин В. А. Зин Мин Хтет Сравнение традиционного и пошагово-итерационного методов вычисления предельных моментов корпуса судна …….. 20

Семенова В. Ю., Аунг Мьо Тхант Определение возмущающих сил, возникающих при совместной качке двух судов на мелководье …… 27

Семенова В. Ю., Киав Тхура Определение нелинейных сил второго порядка, обусловленных разностью частот, возникающих при поперечно-горизонтальных, вертикальных и бортовых колебаниях контура на бихроматическом волнении …… 35

Физические поля корабля, океана, атмосферы и их взаимодействие

Клещёв А. А., Огурцов Ю. П. Рассеяние звука суперкаверной……. 43

Маламанов С. Ю., Павловский В. А. Расчет течения проводящей жидкости в прямолинейном канале квадратного сечения …… 48

Вычислительная техника и управление

Туркин И. И., Крятов А. Ю., Мин Хеин Система автоматического оптимального управления пространственным движением автономного необитаемого подводного аппарата типа глайдер …… 52

Сергеев М. С. Решение вариационной задачи по определению оптимальной зависимости изменения массы рабочего тела реактивного пневматического движителя …….. 59

Управление и обработка информации

Сиек Ю. Л., Борисов А. Н. Исследование погрешности определения дистанции до точек подводного дна по стереоизображению …… 64

Мин Хеин Методы применения адаптивных систем автоматического управления с высоким уровнем искусственного интеллекта для совершенствования сложных объектов морской инфраструктуры …….. 69

Численные методы и комплексы программ

Золотаревич В. П., Салиенко А. Е., Фрумен А. И., Югов Н. В. Использование совместного метода конечных и граничных элементов для анализа резонансных частот рабочего колеса гидротурбины …… 76

Энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

Рогов С. С., Хруцкий О. В. Алгоритм прогнозирования технического состояния узлов роторного корабельного энергетического оборудования по параметрам вибрации ……. 83

Островская Н. В., Рутман Ю. Л. Линеаризация силовых характеристик пластических демпферов, применяемых в системах сейсмоизоляции …….. 89

Подольский М. Е., Черенкова С. В., Иванова М. А. Основное уравнение теории турбин и лопастных машин в пространственной постановке …….. 95

Технология судостроения, судоремонта

и организация судостроительного производства

Абрамов А. В., Когинов М. В., Хмара Д. С. Определение цен на судостроительную продукцию …… 102

CONTENTS

page

About journal …… 7

Theory of the ship and structural mechanics

Manukhin V.A., Tryaskin V.N. Comparative analysis of calculations of ultimate strength of double hull oil tankers and bulk carriers …… 9

Rozhdestvenskii K. V. To the problem of dynamics of cavitation bubble near the rounded leading edge of a hidrofoil …… 14

Manukhin V. A., Zin Min Htet Comparison of traditional and step-iterative methods of calculation of the ultimate moments of the ship's hull …… 20

Semenova V. Y. Aung Myo Thant The determination of the exciting forces during the joint motions of two ships in shallow water …… 27

Semenova V. Y., Kyaw Thura The determination of nonlinear forces of the second order due to the difference of frequencies during the sway, heave and roll of a two-dimensional body on the bichromatic wave …… 35

Physical Fields of Ship, Ocean, Atmosphere and Their Interaction

Kleshchev A. A., Ogurtcov I. P Sound scattering supercavity …… 43

Malamanov S. Y., Pavlovsky V. A. Calculation conductive liquid flow in a straight square section channel …… 48

Computer Engineering and Control System Analysis

Turkin I. I., Kyartov A. Y., Min Hein Automatic optimal control system of spatial motion of autonomous underwater vehicle for type glider …… 52

Sergeev M. S. Solution of the variational problem of determining the optimal dependence of mass change working medium reactive-pneumatic mover …… 59

Control and Processing of Information Control and Processing of Information

Siek J. L., Borisov A. N. The research of error for determining a distance to underwater bottom points on stereoimage …… 64

Min Hein Application of methods of adaptive automatic control system with high level of artificial intelligence for the improvement of complex objects maritime infrastructure …… 69

Numerical Procedures and Software Systems.

Zolotarevich V.P., Salienko A.E., Frumen A.I., Yugov N.V. Use of coupled boundary and finite elements method for analisys of frequencies of runner of hydroturbine …… 76

Ship Power Plants and Their Elements (Main and Auxiliary)

Rogov S. S., Khrutsky O. V. The algorithm of forecasting of the technical condition of rotary nodes of ship power equipment for vibration parameters …… 83

Ostrovskaya N. V., Rutman J. L. The linearization of plastic dampers power characteristics applied in seismoisolaion …… 89

Podolsky M. E., Cherenkova S. V., Ivanova M. A. Basic equation of the theory of turbines and blade machines in spatial formulation …… 95

Ship Repair and Organization of Shipbuilding Production

Abramov A. V., Koginov M. V., Khmara D. S. Determine the price of shipbuilding products ……. 102

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.

Поданы заявки на включение журнала в международные реферативные базы данных SCOPUS и Web of Science

В журнале обязательно рецензирование статей ведущими специалистами по профилю статьи.

Аннотации выпусков журнала с 2008 по 2014 года и с № 3(25) 2014 полные выпуски размещены на сайте **www.morintex.ru**

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

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

Тематика

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

Основные направления

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

ABOUT JOURNAL

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

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

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

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

Subscription index is 99366 in Interregional Subscription Agency.

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

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

Subject

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

Basic Magazine Trends

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

Теория корабля и строительная механика

УДК 539.3

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЕТОВ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ТАНКЕРОВ И НАВАЛОЧНЫХ СУДОВ

Манухин Вадим Анатольевич
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики корабля
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
тел. (812) 494-09-40 e-mail: nika-l6@mail.ru

Тряскин Владимир Николаевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструкции судов
Санкт-Петербургского государственного морского технического университета
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
тел. (812) 494-09-34 e-mail: tryaski.vn@yandex.ru

Аннотация

В статье приводится алгоритм пошагово-итерационного метода вычисления предельных изгибающих моментов для танкеров с двойным корпусом и навалочных судов (балкеров) согласно гармонизированным Общим правилам МАКО. Методология Общих правил основана на применении принципиально новых подходов к анализу конструктивной прочности корпуса с учетом опыта использования существующих унифицированных требований МАКО и правил классификационных обществ. Общие правила МАКО предполагают комплексный анализ безопасности и надежности конструкции корпуса с использованием традиционных методов строительной механики корабля и метода конечных элементов. Расчетная процедура пошагово-итерационного метода реализована в СПбГМТУ в виде программного приложения Ultimate Strength (VB) для PMPC. Приводятся результаты вычисления предельных моментов для танкера типа «VLCC» дедвейтом 300 000 т и балкера типа «CAPESIZE» дедвейтом 195 000 т, которые хорошо согласуются с результатами классификационных обществ – членов МАКО.

Ключевые слова: предельный момент, пошагово-итерационный метод.

.

COMPARATIVE ANALYSIS OF CALCULATIONS OF ULTIMATE STRENGTH OF DOUBLE HULL OIL TANKERS AND BULK CARRIERS

Manukhin Vadim Anatolyevich
PhD, associate professor of Department of ship's structural mechanic,
State Marine Technical University.
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
tel: +7 (812) 494-09-40 e-mail: nika-l6@mail.ru

Tryaskin Vladimir Nikolaevich

Dr.Sci.Tech., professor, head of Department of ship's construction,
State Marine Technical University.
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
tel: +7 (812) 494-09-34 e-mail: tryaski.vn@yandex.ru

Abstract

The algorithm of step by step - iterative method of calculation the ultimate bending moments for double hull oil tankers and bulk carriers (bulker) according to IACS Harmonized Common Structural Rules is presented in article. Methodology of the General Rules based on the application of new approaches to the analysis of structural strength of the shell taking into account the experience of the use of existing IACS unified requirements and regulations of classification societies. IACS Common rules require a comprehensive analysis of the safety and reliability of hull construction using traditional methods of structural mechanics of the ship and the finite element method. Designed procedure were realized in St. Petersburg State Marine Technical University in the form of software named the Ultimate Strength (VB) elaborated by the order of Russian Maritime Register of Shipping. Results of calculation of the ultimate moments calculation

for double hull oil tanker type of «VLCC» with a deadweight of 300 000 t and bulker type of «CAPESIZE» with deadweight of 195 000 t are in good correlation with results of several classification societies – members of IACS.

Key words: the ultimate moment, the step by step - iterative method.

Введение

Разработка Общих правил Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО) как комплекта единых требований к конструкции и прочности корпусов транспортных судов была обусловлена, прежде всего, необходимостью устранения постоянно возраставшей конкуренции между классификационными обществами, использующими собственные критерии и методы оценки безопасности. Первоначально Общие правила были разработаны и введены в действие в 2006 г. отдельно для танкеров с двойным корпусом длиной 150 м и более [1,4] и для навалочных судов с двойными и одинарными бортами длиной 90 м и более [2,5]. С 2012 г. для этих типов судов действуют объединенные (гармонизированные) правила HCSR [6].

Методология Общих правил, основана на применении принципиально новых подходов к анализу конструктивной прочности корпуса с учетом опыта использования существующих унифицированных требований МАКО и правил классификационных обществ. Общие правила МАКО предполагают комплексный анализ безопасности и надежности конструкции корпуса с использованием традиционных методов строительной механики корабля и метода конечных элементов. Они содержат большое число расчетных случаев, подлежащих рассмотрению при выполнении проверочных расчетов, в связи с чем становится актуальной разработка соответствующего программного обеспечения.

На кафедре конструкции судов СПбГМТУ по заказу РМРС выполняется комплекс работ по разработке программного обеспечения расчетов, регламентированных Общими правилами МАКО. Данная статья посвящена программной реализации пошагово-итерационной процедуры расчетов предельной прочности корпусов судов (Incremental-Iterative Method), изложенной в разделе 3 приложения 03 главы 5 части 1 HCSR [6]. Первая версия такого программного обеспечения была разработана М.С.Бойко и использовалась для тестирования требований Общих Правил МАКО со стороны Российского морского Регистра судоходства в рамках международного проекта Cross Check.

1. Алгоритм

Согласно Общим правилам МАКО проверка предельной прочности должна выполняться для судов длиной 150 м и более, при этом размеры продольных связей корпуса судна назначаются с учетом половины надбавки на коррозионный износ. Предельная прочность корпуса судна характеризуется предельным изгибающим моментом, который определяется как для состояния прогиба (sagging condition), так и для перегиба (hogging condition) корпуса. Требование к предельной прочности корпуса судна в Общих правилах МАКО представлено в следующем виде:

$$\frac{M_U}{\gamma_R} \geq \gamma_S M_{SW-U} + \gamma_W M_{WV}, \qquad (1)$$

где M_U - предельный изгибающий момент корпуса судна; M_{SW-U} - изгибающий момент на тихой воде в рассматриваемом сечении по длине средней части судна; M_{WV} - волновой изгибающий момент в рассматриваемом сечении по длине средней части; $\gamma_R, \gamma_S, \gamma_W$ - коэффициенты безопасности.

Пошагово-итерационный метод реализует вычисление вертикального изгибающего момента при прогибе и перегибе судна в расчетном поперечном сечении корпуса в зависимости от кривизны нейтральной оси эквивалентного бруса. Расчетная процедура позволяет получить графическую зависимость изгибающего момента в расчетном поперечном сечении от кривизны нейтральной оси для случаев прогиба и перегиба корпуса, показанную на рис.1.

Экстремальные точки на кривой определяют значения предельного изгибающего момента для прогиба и перегиба корпуса соответственно.

Величина кривизны нейтральной оси корпуса определяется по следующей формуле:

$$\chi = \frac{\theta}{l}, \qquad (2)$$

где θ - относительный угол поворота двух соседних поперечных сечений, находящихся на расстоянии l, равном шпации рамного набора.

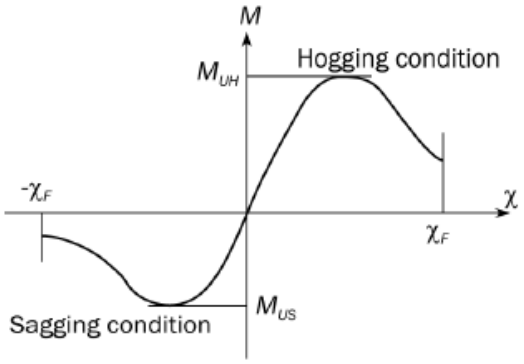


Рис. 1. Зависимость $M(\chi)$

Алгоритм построения зависимости $M(\chi)$ носит итерационный характер и приведен ниже:

1. Поперечное сечение корпуса судна разделяется на отдельные элементы: продольные балки основного набора с примыкающей к ним обшивкой, «жесткие углы» и поперечно подкрепленные листовые элементы.

2. Определяется шаг изменения кривизны для пошагово-итерационной процедуры, при котором в связях верхней палубы изменение напряжения составляет 1% от предела текучести материала.

3. Для всех элементов определяются относительная деформация и нормальное напряжение, соответствующие значению кривизны и положению нейтральной оси. На первом шаге положение нейтральной оси определяется из расчета эквивалентного бруса в упругой области. Напряжения в элементах вычисляются с учетом возможных пластических деформаций и различных видов потери устойчивости. Для каждого типа элементов в Правилах указаны опасные состояния и приведены соответствующие выражения для определения критического напряжения.

4. Определяется новое положение нейтральной оси из условия равенства нулю общего продольного усилия в расчетном сечении корпуса. Изменение положения нейтральной оси приводит к необходимости повторить п.3, пока смещение не станет меньше допустимой точности.

5. Для данного равновесного состояния вычисляется значение изгибающего момента.

6. Увеличивается значение кривизны и п.п. 3-5 повторяются. Критерием остановки расчета является достижение величиной изгибающего момента максимальной величины.

Блок-схема алгоритма приведена в HCSR [6] и показана на рис.2.

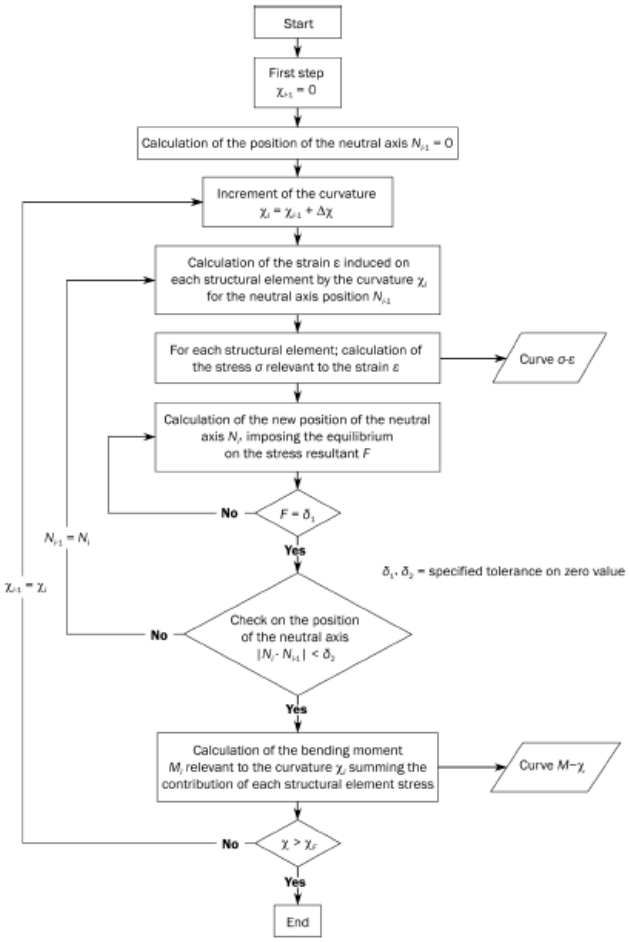


Рис.2 Алгоритм вычисления зависимости $M(\chi)$

2. Программное обеспечение

Рассмотренный выше алгоритм реализован в виде программного приложения Ultimate Strength (VB), модули которого написаны на языке Visual Basic 6.0 [3]. Исходная информация включает в себя четыре текстовых файла, в которых описываются общие характеристики корпуса, продольные балки основного набора с примыкающей к ним обшивкой, «жесткие углы» и поперечно подкрепленные листовые элементы. В выходном текстовом файле для каждого значения кривизны оси корпуса в расчетном сечении приводятся величина вертикального изгибающего момента и положение нейтральной оси.

3. Тестирование

Для тестирования приложения Ultimate Strength (VB) были вычислены предельные изгибающие моменты для танкера типа «VLCC» дедвейтом 300 000 т и балкера типа «CAPESIZE» дедвейтом 195 000 т.

Результаты тестовых расчетов представлены в виде графиков изгибающего момента $M(\chi)$ и аппликаты нейтральной оси $z(\chi)$ в зависимости от ее кривизны χ, показанных на рис. 3-4.

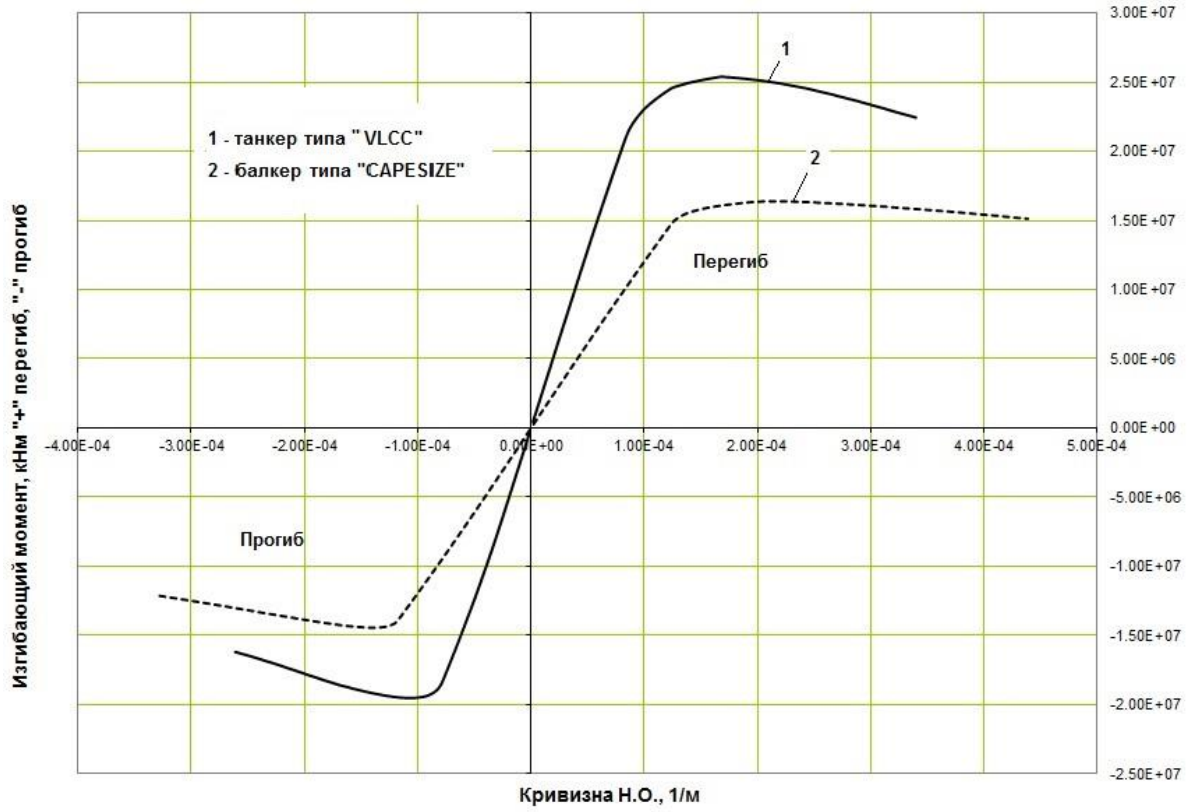


Рис.3 Кривые изгибающего момента

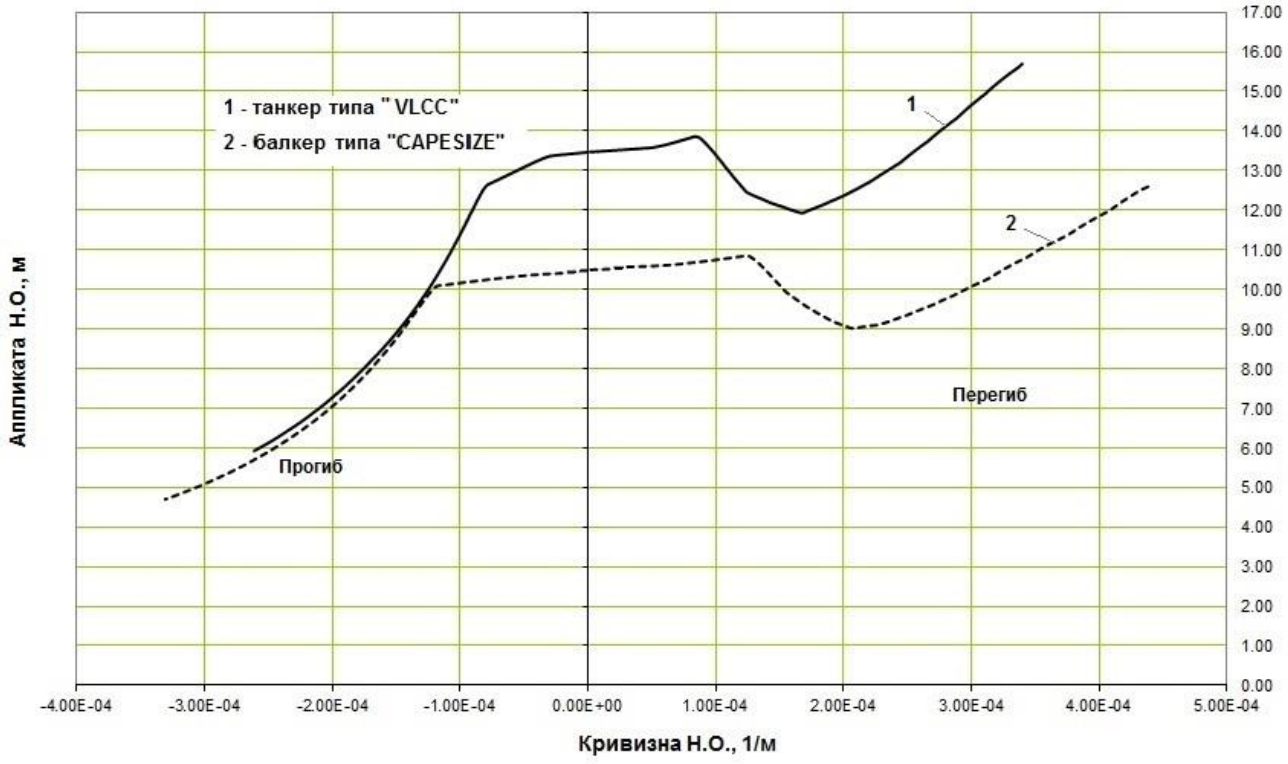


Рис.4 Кривые аппликаты нейтральной оси

Таблица 1

Сопоставление результатов

Классификационное общество	Предельные изгибающие моменты, кНм			
	«VLCC»		«CAPESIZE»	
	M_{US}	M_{UH}	M_{US}	M_{UH}
Class society 1	-	-	14 591 350	16 307 964
Class society 2	19 784 440	-	14 709 710	16 551 290
Class society 3	19 791 536	-	14 561 677	16 308 801
Class society 4	19 364 850	-	14 416 580	16 317 060
Test result	19 518 093	25 391 350	14 439 602	16 387 288

Сопоставление вычисленных в приложении Ultimate Strength (VB) предельных изгибающих моментов (Test rezult) с данными четырех классификационных обществ – членов МАКО для танкера типа «VLCC» и балкера типа «CAPESIZE» приведено в таблице 1. Числовые значения приведены без округлений. Знак «-» означает отсутствие данных.

Заключение

Результаты тестовых расчетов предельных изгибающих моментов, полученные пошагово-итерационным методом, подтверждают работоспособность и удовлетворительную точность разработанного в СПбГМТУ приложения Ultimate Strength (VB). Значения предельных моментов, вычисленные с помощью приложения, попадают в диапазон значений, полученных классификационными обществами – членами МАКО

Литература

1. Правила классификации и постройки морских судов. Т.4. Ч.XVII. Общие правила по конструкции и прочности нефтеналивных судов с двойными бортами. РМРС, 2006

2. Правила классификации и постройки морских судов. Т.4. Ч.XVIII. Общие правила по конструкции и прочности навалочных судов. РМРС, 2006

3. Манухин В.А., Тряскин В.Н. Программное обеспечение расчетов предельной прочности транспортных судов по Правилам МАКО. Тез. докл. конф. по строит. механике корабля, посвящ. памяти проф. П.Ф. Папковича 23-24 дек. 2015 г. С.-Петербург, ФГУП КГНЦ им. акад. А.Н. Крылова, 2015. 35-36

4. Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers. IACS. 2006

5. Common Structural Rules for Bulk Carriers. IACS. 2006

6. Common Structural Rules. IACS. 2012

References

1. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. T.4. Ch.XVII. Obshchie pravila po konstruktsii i prochnosti neftenalivnykh sudov s dvoynymi bortami. RMRS, 2006

2. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. T.4. Ch.XVIII. Obshchie pravila po konstruktsii i prochnosti navalochnykh sudov. RMRS, 2006

3. Manukhin V.A., Tryaskin V.N. Programmnoe obespechenie raschetov predel'noy prochnosti transportnykh sudov po Pravilam MAKO. Tez. dokl. konf. po stroit. mekhanike korablya, posvyashch. pamyati prof. P.F. Papkovicha 23-24 dek. 2015 g. S.-Peterburg, FGUP KGNTs im akad. A.N. Krylova, 2015. pp. 35-36

4. Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers. IACS. 2006

5. Common Structural Rules for Bulk Carriers. IACS. 2006

6. Common Structural Rules. IACS. 2012

УДК 004.-67+532.57+533.6.08

К ЗАДАЧЕ О ДИНАМИКЕ КАВИТАЦИОННОГО ПУЗЫРЬКА ВБЛИЗИ ЗАКРУГЛЕННОЙ НОСОВОЙ ЧАСТИ КРЫЛОВОГО ПРОФИЛЯ

Рождественский Кирилл Всеволодович
д.т.н., профессор
проректор по международному сотрудничеству
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: kvrxmas@yahoo.com

Аннотация

В статье рассматривается упрощенная математическая модель динамики кавитационного пузырька при его движении по линии тока течения в непосредственной близости от закругленной передней кромки крылового профиля малой относительной толщины. При этом локальное поле течения получено посредством асимптотического сращивания решения внешней линеаризованной задачи обтекания тонкого аналитического профиля заданной геометрии с решением задачи обтекания соприкасающейся полубесконечной параболы. В предположении о том, что давление вокруг пузырька в любой рассматриваемый момент времени равно давлению в соответствующей точке линии тока, задача исследования динамики пузырька сводится к решению уравнения Релея-Плессета об эволюции сферического пузырька в переменном поле давления. В качестве примера, приведены результаты расчета динамики парового пузырька от момента зарождения до момента схлопывания в окрестности передней кромки эллиптического профиля при различных значениях угла атаки и относительной толщины

Ключевые слова: *кавитационное обтекание крыльев, пузырьковая кавитация, динамика кавитационного пузырька*

TO THE PROBLEM OF DYNAMICS OF CAVITATION BUBBLE NEAR THE ROUNDED LEADING EDGE OF A HYDROFOIL

Rozhdestvenskii Kirill Vsevolodovich
D. Tech. Sc., Professor
Vice-Rector for International Science & Education
Saint-Petersburg State Marine Technical University
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190008, Russian Federation
e-mail: kvrxmas@yahoo.com

Abstract

This paper considers a simplified mathematical model of dynamics of a cavitation bubble in motion along a streamline in immediate vicinity of a rounded leading edge of a wing foil of small relative thickness. Therewith the local flow field is constructed by means of asymptotic matching of linearized (outer) flow past a thin analytical foil of a given geometry with the local (inner) flow past a semi-infinite osculating parabola. Based on the assumption that the pressure outside of the bubble at any moment of time is equal to that at the corresponding point of the streamline, the problem of bubble dynamics is reduced to solving Rayleigh-Plesset equation for evolution of a spherical bubble in time-dependent pressure field. The approach is exemplified by some results of calculation of dynamics of a vapour bubble from the moment of inception to the moment of collapse in the vicinity of a rounded leading edge of elliptic foil at different magnitudes of angle of attack and relative thickness.

Key words: *cavitating flow around wings, bubble cavitation, dynamics of cavitation bubbles*

Разбиение поля течения при решении задачи обтекания профиля методом сращиваемых асимптотических разложений иллюстрируется на Рис. 1.

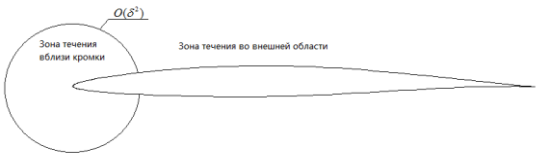


Рис. 1 Разбиение поля течения вблизи крылового профиля

Как показано в [1], в предположениях линейной теории, относительная скорость течения на контуре тонкого, слабоизогнутого профиля, обтекаемого при малом угле атаки стационарным потоком идеальной несжимаемой жидкости, может быть получена в виде

$$\upsilon^o(x) = 1 + \frac{\delta}{\pi} \nu.p. \int_{-1}^{1} \frac{f_t'(\xi) d\xi}{x - \xi} \pm$$

$$\frac{\delta}{2\pi} \nu.p. \int_{-1}^{1} \frac{2\overline{\delta_c} f_c'(\xi) - \overline{\alpha}}{x - \xi} \sqrt{\frac{1+\xi}{1-\xi}} d\xi, \quad (1)$$

где υ^o есть скорость на верхней (знак «+») и нижней (знак «-»)

сторонах профиля, отнесенная к скорости потока на бесконечности U_0, δ - относительная толщина профиля, δ_c - относительная толщина профиля, α -угол атаки в радианах, $f(x)$ и $f_c(x)$ функции порядка $O(1)$, дающие распределения толщины и кривизны; $\overline{\alpha} = \alpha / \delta$, $\overline{\delta_c} = \delta_c / \delta$ - параметры порядка $O(1)$.

Отметим, что интегралы, входящие в формулу (1), вычисляются в смысле главного значения по Коши и могут быть сведены к квадратурам практически для любого профиля, имеющего аналитическое описание. Можно показать, что решение, выражаемое формулой (1), теряет пригодность в окрестности порядка $O(\delta^2)$ закругленной передней кромки.

Комплексный потенциал течения в окрестности передней закругленной кромки, которая с погрешностью $O(\delta^2)$ аппроксимируется полубесконечной параболой, нетрудно построить методами теории функций комплексного переменного, [1].

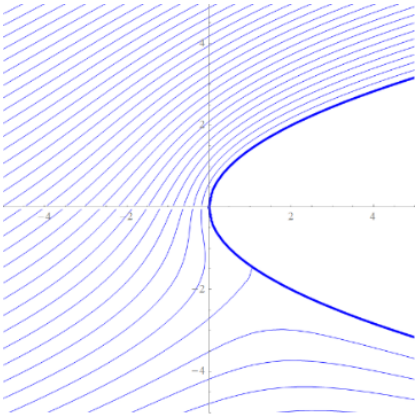


Рис. 2 Характерный спектр обтекания закругленной передней кромки

В частности, относительная полная скорость на контуре параболической передней кромки может быть найдена по формуле

$$\upsilon^i(X) = \sqrt{\frac{X}{X + \frac{1}{2}\bar{r}_{le}}}\left(U_1 \pm \frac{U_2}{\sqrt{X}}\right), \quad (2)$$

где υ^i представляет собой скорость в точке контура параболы на ее верхней (знак «+») и нижней (знак «-») сторонах, $X = x_{le}/r_{le}$ растянутая абсцисса, отсчитываемая от вершины кромки, $\bar{r}_{le} = r_{le}/\delta^2$, r_{le} - радиус кривизны передней кромки, отнесенный к полухорде профиля, U_1 и U_2 - параметры, ассоциируемые соответственно с относительными скоростями локального потока, набегающего на кромку, и циркуляционного потока, обтекающего кромку по касательной. Заметим, что для заданного семейства аналитических профилей отношение радиуса кривизны передней кромки к квадрату относительно толщины профиля $\bar{r}_{le}$ является постоянной величиной.

Коэффициент давления в точках контура носовой части профиля с учетом (2) может быть вычислен по формуле

$$p^i(X) = 1 - \frac{X}{X + \frac{1}{2}\bar{r}_{le}}\left(U_1 \pm \frac{U_2}{\sqrt{X}}\right)^2 \quad (3)$$

Как показано в [1] параметры U_1 и U_2 могут быть найдены посредством асимптотического сращивания (гладкого сопряжения) *внешнего* по отношению к окрестности кромки решения (1) и *внутреннего* решения (2), описывающего поток вблизи соприкасающейся параболы. В частности, в случае стационарного обтекания аналитических профилей, эти параметры имеют следующую структуру

$$U_1 = 1 + \delta\, u_\delta, \quad (4)$$

$$U_2 = \overline{\alpha}\sqrt{2} - \overline{\delta_c} u_c. \quad (5)$$

В приводимой ниже таблице приведены значения u_δ и u_c для некоторых семейств профилей, [2,3]

Тип профиля	u_δ	u_c	$\bar{r}_{le}$
эллипс	1	0	1
NACA-66012 (симметр.)	0.817	0	0.874
Профиль Вальхнера $GÖ-7$	0.919	0.246	0.964
NACA-4412	2	0.296	1.026
NACA-66m (a=0.8)	0.75	0.208	0.848

Замкнутый вид выражений для относительной скорости и коэффициента давления на поверхности полубесконечной параболы, совпадающей с контуром закругленной передней кромки, дает возможность получить простые и универсальные формулы для минимального значения коэффициента давления и абсцисс критической точки ($p^i = 1$) и точки минимального давления (максимального разрежения, $p^i = p^i{}_{\min}$), [4].

Приравнивая нулю производную коэффициента давления $p^i(X)$ по растянутой абсциссе X получим следующее выражение для растянутой абсциссы точки минимума давления

$$X_m = \frac{(x_{le})_m}{r_{le}} = \frac{(x_{le})_m}{\delta^2 \bar{r}_{le}} = \frac{U_1^2}{4U_2^2}, \quad (6)$$

где $(x_{le})_m$ представляет собой абсциссу минимума давления, отнесенную к полухорде профиля.

Подстановка (6) в (3) приводит к следующему выражению для минимального значения коэффициента давления

$$p^i_{\min} = 1 - U_1^2 - \frac{2U_2^2}{r_{le}}. \quad (7)$$

Из выражения (2) для скорости на контуре передней кромки нетрудно видеть, что скорость обращается в ноль на нижней стороне профиля, в точке с растянутой абсциссой

$$X_s = \frac{(x_{le})_s}{\bar{r}_{le}\delta^2} = \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2. \quad (8)$$

Рассмотрение выражений (6) и (8) приводит к *замечательной* формуле, [4]

$$X_m X_s = \frac{1}{4}. \quad (9)$$

или

$$(x_{le})_m \cdot (x_{le})_s = \frac{1}{4} r_{le}^2. \quad (10)$$

Согласно (9)-(10) **произведение растянутых абсцисс критической точки и точки минимума давления для заданного семейства профилей постоянно**.

В простейшем случае эллиптического профиля относительной толщины δ, обтекаемого под углом атаки α, выражения для минимального коэффициента давления и растянутых абсцисс точек минимального и максимального давления принимают вид

$$p^i_{\min}(\alpha,\delta) = 1 - (1+\delta)^2 - 4\frac{\alpha^2}{\delta^2}, \quad (11)$$

или

$$p^i_{\min}(\alpha,\delta) = -2\delta - \delta^2 - 4\frac{\alpha^2}{\delta^2}, \quad (12)$$

$$X_s = \frac{2\alpha^2}{\delta^2(1+\delta)^2}, \quad (13)$$

$$X_m = \frac{(1+\delta)^2\delta^2}{8\alpha^2}. \quad (14)$$

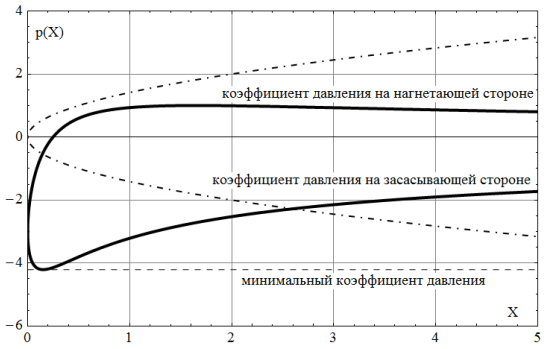


Рис. 3 Распределение коэффициента давления по носовой части профиля в функции от растянутой абсциссы X (эллипс, $\alpha = \delta = 0.1$)

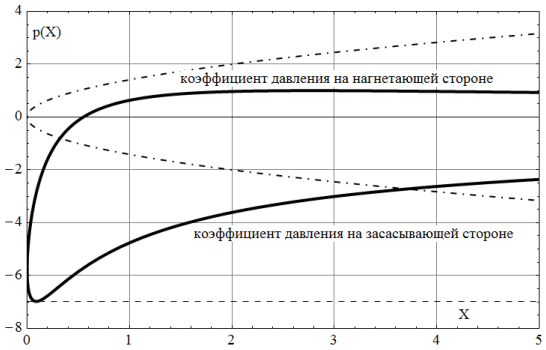


Рис. 4 Распределение коэффициента давления по носовой части профиля в функции от растянутой абсциссы X (эллипс, $\alpha = 0.13, \delta = 0.1$)

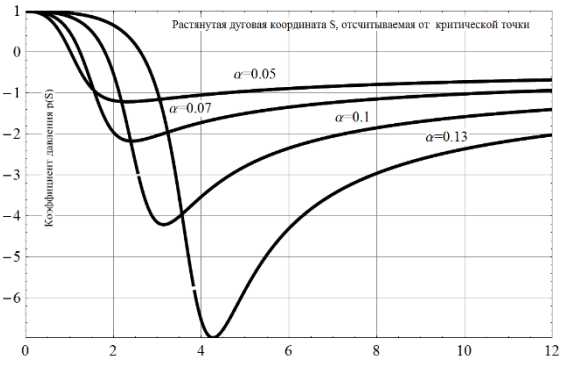


Рис. 5 Зависимость коэффициента давления от растянутой дуговой координаты, отсчитываемой от критической точки (эллипс, $\delta = 0.1$)

Для моделирования динамики (парового) кавитационного пузырька вблизи закругленной паровой части профиля используем упрощенное (без учета сил поверхностного натяжения, вязкости и газосодержания) уравнение Релея-Плессета, [5]

$$R\ddot{R}+\frac{3}{2}\dot{R}^2=-\frac{P(t)}{\rho}, \quad (15)$$

где $R=R(t)$ -радиус пузырька в $м$, t - время в $с$, $P(t)$ - давление вне пузырька в $н/м^2$ в функции времени, ρ - плотность жидкости в $кг/м^3$, точки означают дифференцирование по времени. В дальнейшем в качестве начальных условий рассмотрим

$$R(0)=R_0,\ \dot{R}(0)=0. \quad (16)$$

Для того, чтобы получить зависимость $P(t)$ давления от времени, предположим, что паровой пузырек, возникший в некоторой точке потока, в дальнейшем движется по проходящей через эту точку линии тока. В данной работе мы ограничимся рассмотрением случая, когда пузырек движется по линии тока, непосредственно примыкающей к профилю.

Размерное давление P выражается через коэффициент давления p по формуле

$$P=p\frac{\rho U_o^2}{2}+P_0, \quad (17)$$

где P_0 - давление на бесконечности, U_0 - скорость набегающего потока. Учтем далее, что скорость течения, при которой в некоторой точке контура профиля возникает паровой пузырек, равна скорости начала кавитации U_0^{ci}, которая, в свою очередь определяется по формуле

$$U_0^{ci}=\sqrt{\frac{2(\mathrm{P}_0-\mathrm{P}_{sv})}{\rho\kappa}}, \quad (18)$$

где P_{sv} - давление насыщенного пара, κ - число кавитации.

С точки зрения представления расчетных данных по динамике пузырька удобно привести уравнение Релея-Плессета (15) к безразмерному виду.

Введем безразмерное время

$$\tau=\frac{t}{R_0}\sqrt{\frac{P_0}{\rho}}, \quad (19)$$

Используя приведенные ранее формулы, нетрудно найти параметрические зависимости безразмерного времени τ и коэффициента давления p от растянутой абсциссы X. Принимая, как отмечалось выше, что паровой пузырек движется по линии тока, совпадающей с контуром профиля, рассмотрим дифференциальное уравнение движения пузырька по линии тока как материальной точки в виде

$$\upsilon^i(S)=\frac{c}{U_0^{ci}}\frac{ds}{dt}=\frac{\delta^2\bar{r}_{le}}{U_0^{ci}R_0}\sqrt{\frac{P_0}{\rho}}\frac{dS}{d\tau}=$$

$$\frac{r_{le}}{U_0^{ci}R_0}\sqrt{\frac{P_0}{\rho}}\frac{dS}{d\tau}=\frac{r_{le}}{R_0}\sqrt{\frac{\kappa}{2}\left(1-\frac{P_{sv}}{P_0}\right)}\frac{dS}{d\tau}, \quad (20)$$

где $S=s/r_{le}$, s и S - дуговая координата и растянутая дуговая координата центра пузырька, отсчитываемые от точки его возникновения. Отметим, что давление насыщенного пара P_{sv} значительно меньше, чем P_0, так что (20) можно переписать более кратко как

$$\upsilon^i(S)=\frac{r_{le}}{R_0}\sqrt{\frac{\kappa}{2}}\frac{dS}{d\tau} \quad (21)$$

Заметим, что для параболической кромки с уравнением засасывающей (+) и нагнетающей (-) сторон

$$Y(X)=\pm\sqrt{2X}, \quad (22)$$

связь растянутых дуговой координаты S и абсциссы X для эллиптического профиля определяется выражением

$$\frac{dS}{dX}=\pm\sqrt{1+\left(\frac{dY}{dX}\right)^2}=\pm\sqrt{1+\left(\frac{1}{\sqrt{2X}}\right)^2}=$$

$$=\pm\sqrt{\frac{X+\frac{1}{2}}{X}}, \quad (23)$$

интегрирование которого от точки возникновения парового пузырька (с растянутой абсциссой X_{ci}) дает связь растянутой дуговой координаты и растянутой абсциссы в виде

$$S=\pm\int_{X_{ci}}^{X}\sqrt{\frac{X+\frac{1}{2}}{X}}dX=$$

$$\pm\left(\sqrt{X}\sqrt{X+\frac{1}{2}}-\sqrt{X_{ci}}\sqrt{X_{ci}+\frac{1}{2}}+\right.$$

$$\left.\frac{1}{2}\ln\frac{\sqrt{X}+\sqrt{X+1}}{\sqrt{X_{ci}}+\sqrt{X_{ci}+1}}\right) \quad (24)$$

При этом растянутая абсцисса X_{ci} точки контура профиля, в которой появился пузырек, определяется с учетом формулы (3) из уравнения

$$p(X_{ci})=-\kappa. \quad (25)$$

В частности, если пузырек возник в точке минимума давления

$$X_{ci} = X_m,\ p(X_{ci}) = p(X_m) = p_{\min} = -\kappa. \quad (26)$$

Зависимость безразмерного времени τ от X получается после интегрирования уравнения (20)

$$\tau = \frac{r_{le}}{R_0}\sqrt{\frac{\kappa}{2}}\int_0^S \frac{dS}{\upsilon^i(S)} = \frac{r_{le}}{R_0}\sqrt{\frac{\kappa}{2}}\int_{X_{ci}}^X \frac{\frac{dS}{dX}dX}{\upsilon^i(X)} =$$

$$\pm\frac{r_{le}}{R_0}\sqrt{\frac{\kappa}{2}}\int_{X_{ci}}^X \frac{\left(X+\frac{1}{2}\right)dX}{\sqrt{X}\,(U_1\sqrt{X}\pm U_2)} =$$

$$\pm\frac{r_{le}}{R_0}\sqrt{\frac{\kappa}{2}}\left\{\frac{1}{U_1^2}\left[2U_1(\sqrt{X_{ci}}-\sqrt{X})+U_1(X-X_{ci})\right]+\right.$$

$$\left.\frac{1}{U_1}\left(1+2\frac{U_2^2}{U_1^2}\right)\ln\frac{U_1\sqrt{X}\pm U_2}{U_1\sqrt{X_{ci}}\pm U_2}\right\} \quad (27)$$

Формулы (3) и (24) дают параметрическую зависимость $p[X(\tau)]$. В итоге, зависимость размерного давления от времени принимает вид

$$\mathrm{P}(\tau) = \frac{p(\tau)}{\kappa}(\mathrm{P}_0 - \mathrm{P}_{sv}) + \mathrm{P}_0 =$$

$$P_0\left[1+\frac{p(\tau)}{\kappa}\left(1-\frac{P_{sv}}{P_0}\right)\right]. \quad (28)$$

После нормирования радиуса пузырька по его значению в момент возникновения уравнение Релея-Плессета может быть записано в следующем (безразмерном) виде

$$\overline{R}\frac{d^2\overline{R}}{d\tau^2}+\frac{3}{2}\left(\frac{d\overline{R}}{d\tau}\right)^2 = -1-\frac{p(\tau)}{\kappa}\left(1-\frac{P_{sv}}{P_0}\right) \quad (29)$$

Такая запись уравнения Релея-Плессета позволяет представлять расчетные данные в более компактном виде. Ниже приведены некоторые результаты расчетов. В частности, на Рис. 6 для случая, когда кавитация начинается на засасывающей стороне профиля в точке минимума давления, показана зависимость нормированного радиуса пузырька $\overline{R}$ от безразмерного времени для эллиптического профиля с относительной толщиной $\delta = 0.1$ при различных значения угла атаки (в радианах) при отношении начального радиуса пузырька к радиусу закругления передней кромки $R_0 / r_{le} = 0.2$.

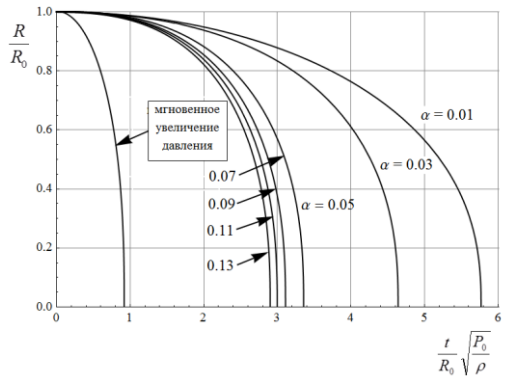


Рис. 6 Характерные зависимости нормированного радиуса парового пузырька от безразмерного времени при различных значениях угла атаки, эллиптический профиль, $\delta = 0.1, R_0 / r_{le} = 0.2.$

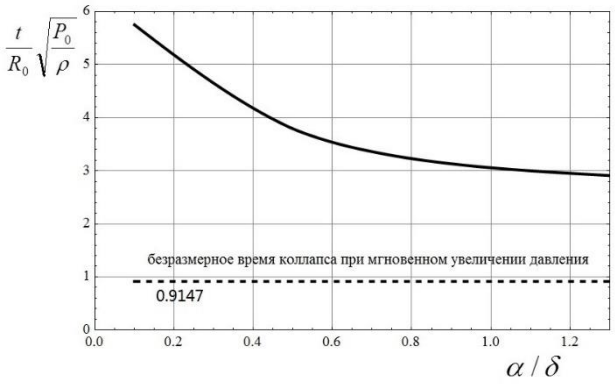


Рис. 7 Зависимость безразмерного времени схлопывания парового пузырька от отношения угла атаки (в радианах) к относительной толщине профиля при $\kappa = -p_{\min}$ ($\delta = 0.1, R_0 / r_{le} = 0.2$)

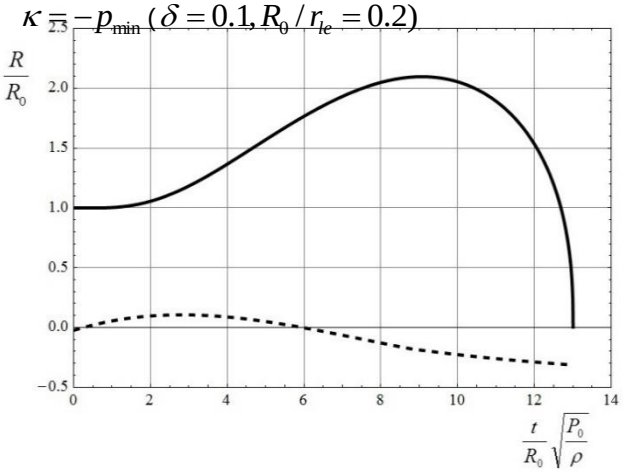


Рис. 8 Динамика пузырька при $k < -p_{\min}$

$$\kappa = 3, \delta = 0.1, \alpha = 0.1, p_{\min} = -4.21, R_0 / r_{le} = 0.2$$

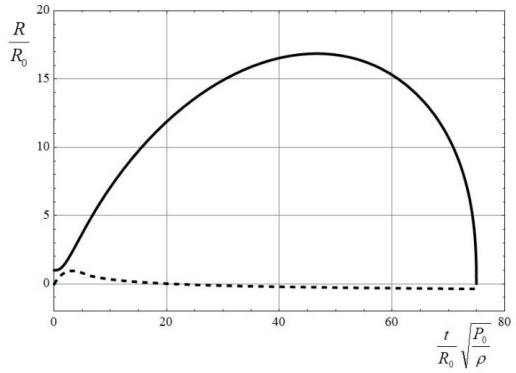


Рис. 9 Динамика пузырька при $\kappa < -p_{\min}$, $\kappa = 0.96, \delta = 0.1, \alpha = 0.07, p_{\min} = -2.17, R_0 / r_{le} = 0.2$

На Рис. 8 и 9 приведены характерные расчетные данные по динамике парового пузырька при значении числа кавитации $\kappa < -p_{\min}$. В этом случае, после возникновения, паровой пузырек сначала попадает в зону еще меньшего давления и расширяется, а затем, после сноса в зону увеличения давления – сжимается вплоть до схлопывания. Пунктиром на тех же графиках показана правая часть уравнения (29).

Выводы

В данной работе получены основные соотношения для исследования динамики парового пузырька вблизи закругленной передней кромки тонкого профиля крыла.

При этом локальное распределение коэффициента давления, его минимальное значение, абсциссы критической точки и точки минимума давления определены в замкнутом виде.

Путем введения характерного времени и отнесения текущего радиуса пузырька к его начальному значению, уравнение Релея-Плессета приведено к безразмерному виду, что позволяет компактно представлять расчетные данные в функции безразмерного времени при заданном отношении начального радиуса пузырька к радиусу закругления передней кромки с учетом значений относительной толщины и кривизны профиля, а также угла атаки.

Изложенный метод может быть распространен на случай нестационарного обтекания, а также для крыла конечного удлинения и гребного винта. Его нетрудно модифицировать при учете влияния поверхностного натяжения и вязкости.

Автор выражает признательность профессору А.Ш. Ачкинадзе и к.т.н. С.В. Тарасову за участие в обсуждении этой работы.

Литература

1. Рождественский К.В., «Метод сращиваемых асимптотических разложений в гидродинамике крыла», *Ленинград, Издательство «Судостроение», 1979, 208 с.*
2. Рождественский К.В., Мишкевич В.Г., «Расчет нестационарного обтекания тонкого профиля на основе метода сращиваемых асимптотических разложений», *Вопросы судостроения, сер. «Проектирование судов», 1983, выпуск 37, с. 60-73.*
3. Плисов Н.Б., Рождественский К.В. «Гидроаэродинамические характеристики крыльевых систем судов с динамическим поддержанием», *Ленинград, ЛКИ, 1984, 95 с.*
4. Рождественский К.В. «Асимптотические методы в гидродинамике судна», *Ленинград, Издательство Ленинградского кораблестроительного института, 1984, 102 с.*
5. Lord Rayleigh « On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity», *Phil. Mag., 34, 94-98.*
6. Рождественский В.В. «Кавитация», *Издательство «Судостроение», Ленинград, 1977.*
7. Левковский Ю.Л., «Структура кавитационных течений», *Ленинград, Издательство «Судостроение», 1978, 224 с.*
8. Brennen C.E. «Cavitation and bubble dynamics», *Oxford University Press, New-York-Oxford, 1995, 282 p.*

References

1. Rozhdestvenskii K.V., «Metod sraschivaemyh asimptoticheskih razlozhenii v gidrodinamike kryla*», Leningrad, Izdatel'stvo «Sudostroenie», 1979, 208 s.*
2. Rozhdestvenskii K.V., Mishkevich V.G., «Raschet nestacionarnogo obtekanija tonkogo profilja na osnove metoda srashivaemyh asimptoticheskih razlozhenii», *Voprosy sudostroenija, ser. «Proektirovanie sudov», 1983, vypusk 37, s. 60-73.*
3. Plisov N.B., Rozhdestvenskii K.V. «Gidroayerodinamicheskie harakteristiki kryl'evyh sistem sudov s dinamicheskim podderzhaniem», *Leningrad, LKI, 1984, 95 s.*
4. Rozhdestvenskii K.V. «Asimptoticheskie metody v gidrodinamike sudna», *Leningrad, Izdatel'stvo Leningradskogo korablestroitel'nogo instituta, 1984, 102 s.*
5. Lord Rayleigh «On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity», *Phil. Mag., 34, 94-98.*
6. Rozhdestvenskii V.V. «Kavitacija», *Izdatel'stvo «Sudostroenie», Leningrad, 1977.*
7. Levkovskii YU.L., «Struktura kavitacionnyh techenii», *Leningrad, Izdatel'stvo «Sudostroenie», 1978, 224 s.*
8. Brennen C.E. «Cavitation and bubble dynamics», *Oxford University Press, New-York-Oxford, 1995, 282 p.*

УДК 539.3

СРАВНЕНИЕ ТРАДИЦИОННОГО И ПОШАГОВО-ИТЕРАЦИОННОГО МЕТОДОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ МОМЕНТОВ КОРПУСА СУДНА

Манухин Вадим Анатольевич
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики корабля
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: nikal6@mail.ru

Зин Мин Хтет
магистрант кафедры строительной механики корабля,
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: zinmin.353828@gmail.com

Аннотация

В статье приводятся алгоритмы традиционного (по методике академика Ю.А. Шиманского) и пошагово-итерационного метода (согласно Общим правилам МАКО) вычисления предельных изгибающих моментов. Методология Общих правил основана на применении принципиально новых подходов к анализу конструктивной прочности корпуса с учетом опыта использования существующих унифицированных требований МАКО и правил классификационных обществ. Общие правила МАКО предполагают комплексный анализ безопасности и надежности конструкции корпуса с использованием традиционных методов строительной механики корабля и метода конечных элементов. Расчетная процедура пошагово-итерационного метода реализована в СПбГМТУ в виде программного приложения Ultimate Strength (VB) для РМРС. Результаты вычисления предельных моментов, полученные традиционным методом, сопоставляются с результатами, полученными пошагово-итерационном методом, для танкера «Владивосток» дедвейтом 15 000 т.

Ключевые слова: традиционный метод, пошагово-итерационный метод, предельный момент.

COMPARISON OF TRADITIONAL AND STEP-ITERATIVE METHODS OF CALCULATION OF THE ULTIMATE MOMENTS OF THE SHIP'S HULL

Manukhin Vadim Anatolievich
PhD, associate professor of Department of ship's structural mechanic,
State Marine Technical University.
3, Lotsmanskaya Str., St.Petersburg, 190008 Russia.
e-mail: nikal6@mail.ru

Zin Min Htet
Master student of Department of ship's structural mechanic,
State Marine Technical University
3, Lotsmanskaya Str., St.Petersburg, 190008 Russia.
e-mail: zinmin.353828@gmail.com

Abstract

Algorithms traditional (by a technique of the academician Yu.A. Shimansky) and step by step - iterative method (according to IACS Harmonized Common Structural Rules) calculations of the ultimate bending moments are given in article. Methodology of the General Rules based on the application of new approaches to the analysis of structural strength of the shell taking into account the experience of the use of existing IACS unified requirements and regulations of classification societies. IACS Common rules require a comprehensive analysis of the safety and reliability of hull construction using traditional methods of structural mechanics of the ship and the finite element method. Settlement procedure step by step - iterative method is realized in St. Petersburg State Marine Technical University in the form of the Ultimate Strength (VB) software application for RMRS. The results of calculation of the ultimate bending moments received by a traditional meth-

od are compared with the results received step by step - iterative method, for the tanker “Vladivostok” with a deadweight of 15 000 t.

Keywords: the traditional method, the step by step - iterative method , the ultimate moment.

Введение

Корпус судна представляет собой сложную структуру, состоящую из оболочки (обшивки и настилов), подкрепленной балками и ребрами жесткости. Эта оболочка подвергается нагрузкам, обусловленным силами тяжести корпуса с грузом и оборудованием, а также силами плавучести, вызывающими возникновение изгибающего момента и перерезывающей силы в вертикальной продольной плоскости судна. Кроме того, в бурном море при значительной качке судно подвергается воздействию как дополнительного волнового вертикального изгибающего момента, так и горизонтального изгибающего и крутящего моментов и соответствующих перерезывающих сил.

Наиболее важным для оценки прочности корпуса является вертикальный изгибающий момент, величина которого существенно больше горизонтального. Кроме того, ширина судна больше, чем его высота борта. Поэтому возникающие напряжения в элементах корпуса судна от вертикального изгиба оказываются наибольшими, особенно в средней его части.

Предельная прочность корпуса характеризуется предельными вертикальными изгибающими моментами в положении судна на вершине волны (ВВ) и на подошве волны (ПВ). Предельный момент представляет собой предельную нагрузку, при которой происходит разрушение конструкции из-за потери её структурной жесткости и прочности, вызванной

- потерей устойчивости сжатых связей;
- пластической деформацией растянутых и сжатых связей.

На рис.1 точка А соответствует нагрузке, при которой происходит потеря устойчивости некоторых сжатых элементов корпуса судна. Точка Б соответствует предельной нагрузке, которую может выдержать корпус судна. Если при проектировании применяется расчетный уровень нагрузки 2, корпус будет в безопасности, но если применяется уровень 1, возможно разрушение корпуса. Зная предельную нагрузку, можно оценить истинный запас прочности корпуса судна путем сравнения предельной нагрузки с расчетной.

Чтобы получить безопасную и экономичную конструкцию корпуса судна, а также максимально возможную грузоподъемность, предельная нагрузка должна быть оценена достаточно точно. Настоящая работа посвящена сравнению двух методов оценки предельных вертикальных изгибающих моментов корпусов крупнотоннажных коммерческих наливных и навалочных судов.

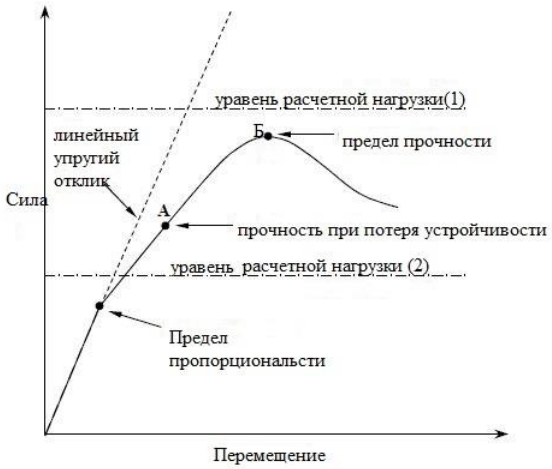


Рис 1. Проектирование корпуса судна на основе предела прочности

1. Требования Правил

Согласно Общим правилам МАКО проверка предельной прочности должна выполняться для танкеров с двойным корпусом длиной 150 м и более и для навалочных судов с двойными или одинарными бортами длиной 90 м и более, при этом размеры продольных связей корпуса судна назначаются с учетом половины надбавки на коррозионный износ.

Предельная прочность корпуса судна характеризуется предельным изгибающим моментом, который определяется как для состояния прогиба (sagging condition), так и для перегиба (hogging condition) корпуса. Требование к предельной прочности корпуса судна в Общих правилах МАКО представлено в следующем виде:

$$\frac{M_U}{\gamma_R} \geq \gamma_S M_{SW-U} + \gamma_W M_{WV}, \qquad (1)$$

где M_U - предельный изгибающий момент корпуса судна; M_{SW-U} - изгибающий момент на тихой воде в рассматриваемом сечении по длине средней части судна; M_{WV} - волновой изгибающий момент в рассматриваемом сечении по длине средней части; $\gamma_R, \gamma_S, \gamma_W$ - коэффициенты безопасности.

Расчетная процедура позволяет получить графическую зависимость изгибающего момента в расчетном поперечном сечении от кривизны

нейтральной оси для случаев прогиба и перегиба корпуса, показанную на рис.1. Экстремальные точки на кривой определяют значения предельного

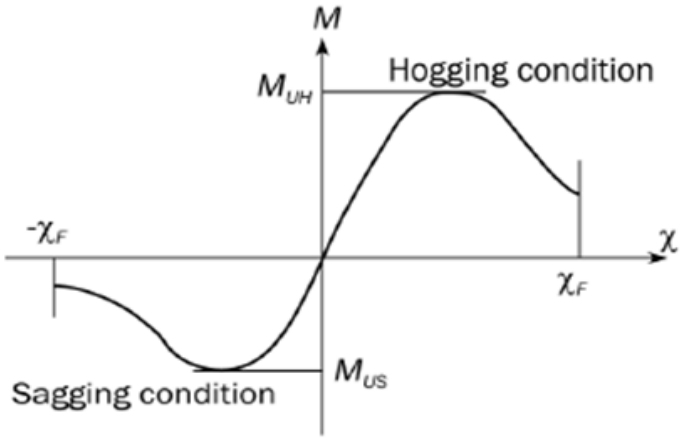


Рис.2. Зависимость $M(\chi)$

изгибающего момента для прогиба и перегиба корпуса соответственно.

Величина кривизны нейтральной оси корпуса определяется по следующей формуле:

$$\chi = \frac{\theta}{l}, \qquad (2)$$

где θ - относительный угол поворота двух соседних поперечных сечений, находящихся на расстоянии l, равном шпации рамного набора.

Согласно Правилам МАКО предельные моменты могут быть вычислены одношаговой или пошагово-итерационной процедурой. В качестве альтернативы регламентируется использовать метод конечных элементов (МКЭ) в нелинейной постановке.

2. Традиционный метод

В отечественной судостроительной практике оценка предельных вертикальных изгибающих моментов производилась по методике Ю.А. Шиманского. Предельный изгибающий момент в ней вычисляется по формулам

$$M^i_{пред} = \sigma_T \cdot W^i_T, \qquad (3)$$

$$W_T{}^i = \frac{I_y{}^i}{H - e_i}, \qquad (4)$$

$$I_y{}^i = \int_A (e_i)^2 dA, \qquad (5)$$

где W^i_T - момент сопротивления верхней палубы; I^i_y и e_i - момент инерции относительно нейтральной оси и отстояние нейтральной оси расчетного поперечного сечения корпуса от основной плоскости в *i*-ом приближении; *H* - высота борта в расчетном сечении; σ_T - предел текучести материала корпуса.

Для оценки устойчивости связей в предельном состоянии используется таблица 1, шапка которой показана ниже.

Таблица 1

№ связи	Наименование связи	$\sigma_{кр\,i}$, МПа	*i*-е приближение					
			$z_i^{ВВ}$, м	$z_i^{ПВ}$, м	Предельные напряжения МПа		Редукционные коэффициенты	
					$\sigma_i{}^{ВВ}$	$\sigma_i{}^{ПВ}$	ВВ	ПВ
1	2	3	4	5	6	7	8	9

В 1-ю и 2-ю колонки таблицы 1 заносят все продольные связи расчетного сечения корпуса, в 3-ю - критические напряжения связей, в 4-ю и 5-ю - отстояние центров тяжести связей от нейтральной оси, а в 6-ю и 7-ю - напряжения в связях, соответствующие предельному состоянию корпуса при перегибе и прогибе, вычисляемые по формулам

$$\sigma_i{}^{ВВ} = -\frac{z_i^{ВВ}}{H - e_i^{ВВ}} \cdot \sigma_T; \quad \sigma_i{}^{ПВ} = +\frac{z_i^{ПВ}}{H - e_i^{ПВ}} \cdot \sigma_T \qquad (6)$$

В колонки 8 и 9 заносят редукционные коэффициенты только для сжатых связей, в которых сжимающие предельные напряжения превышают критические. Их вычисляют по формулам

$$\varphi_i{}^{ВВ} = \frac{\sigma_{кр}}{|\sigma^{ВВ}{}_i|}; \quad \varphi_i{}^{ПВ} = \frac{\sigma_{кр}}{|\sigma^{ПВ}{}_i|}. \qquad (7)$$

Для всех связей, теряющих устойчивость, раздельно для перегиба и прогиба судна вычисляют поправки к редуцируемым площадям

$$\Delta A_i^{ВВ} = A_{ред}(\varphi_i^{ВВ} - 1); \quad \Delta A_i^{ПВ} = A_{ред}(\varphi_i^{ПВ} - 1). \qquad (8)$$

С учетом поправок (8) вычисляются e_{i+1}, I_y^{i+1} и W_T^{i+1} для *i*+1 -го приближения.

По вычисленным в итоге последовательных приближений с заданной точностью моментам сопротивления верхней палубы находят предельные изгибающие моменты для перегиба и прогиба корпуса по формулам

$$M^{ВВ}_{пред} = \sigma_T \cdot W_T^{ВВ}; \quad M^{ПВ}_{пред} = \sigma_T \cdot W_T^{ПВ}. \qquad (9)$$

Одношаговый метод расчета предельных изгибающих моментов, регламентированный Общими правилами МАКО по сути представляет собой реализацию 1-го приближения традиционного метода Ю.А. Шиманского. Оба метода представляет собой упрощенный расчет, основанный на редуцировании жесткости эквивалентного бруса при изгибе.

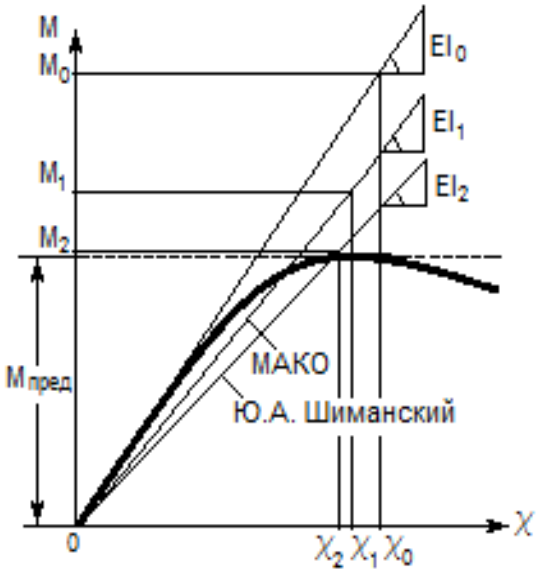


Рис.3 Зависимость «момент - кривизна эквивалентного бруса» при традиционной и одношаговой процедуре

Уменьшение жесткости эквивалентного бруса EI_0 вызвано возможной потерей устойчивости отдельных продольных элементов, таких как листы, ребра жесткости, балки, поперечно подкрепленные панели и т.д. на стороне сжатия от нейтральной оси. Из рис.3 видно, что при прочих равных условиях методика Ю.А. Шиманского дает более точное значение предельного момента за счет последовательного уточнения редукционных коэффициентов.

3. Пошагово-итерационный метод

Пошагово-итерационный метод, регламентируемый Общими правилами МАКО, реализует вычисление вертикального изгибающего момента при прогибе и перегибе судна в расчетном поперечном сечении корпуса в зависимости от кривизны нейтральной оси эквивалентного бруса в этом сечении. Расчетная процедура позволяет получить графическую зависимость изгибающего момента в расчетном поперечном сечении от кривизны нейтральной оси для случаев прогиба и перегиба корпуса, показанную на рис.2.

Алгоритм построения зависимости $M(\chi)$, блок-схема которого приведена в разделе 3 приложения 03 главы 5 части 1 HCSR [7] и показана на рис.4, носит итерационный характер и приведен ниже.

1. Поперечное сечение корпуса судна разделяется на отдельные элементы: продольные балки основного набора с примыкающей к ним обшивкой, «жесткие углы» и поперечно подкрепленные листовые элементы.

2. Определяется шаг изменения кривизны для пошагово-итерационной процедуры, при котором в связях верхней палубы изменение напряжения составляет 1% от предела текучести материала.

3. Для всех элементов определяются относительная деформация и нормальное напряжение, соответствующие значению кривизны и положению нейтральной оси. Начальное положение нейтральной оси определяется из линейного расчета эквивалентного бруса в упругой области. Напряжения в элементах вычисляются с учетом возможных пластических деформаций и различных видов потери устойчивости. Для каждого типа элементов в Правилах указаны опасные состояния и приведены соответствующие выражения для определения критического напряжения.

4. Определяется новое положение нейтральной оси из условия равенства нулю общего продольного усилия в расчетном сечении корпуса. Изменение положения нейтральной оси приводит к необходимости повторить п.3, пока ее смещение не станет меньше допустимой точности.

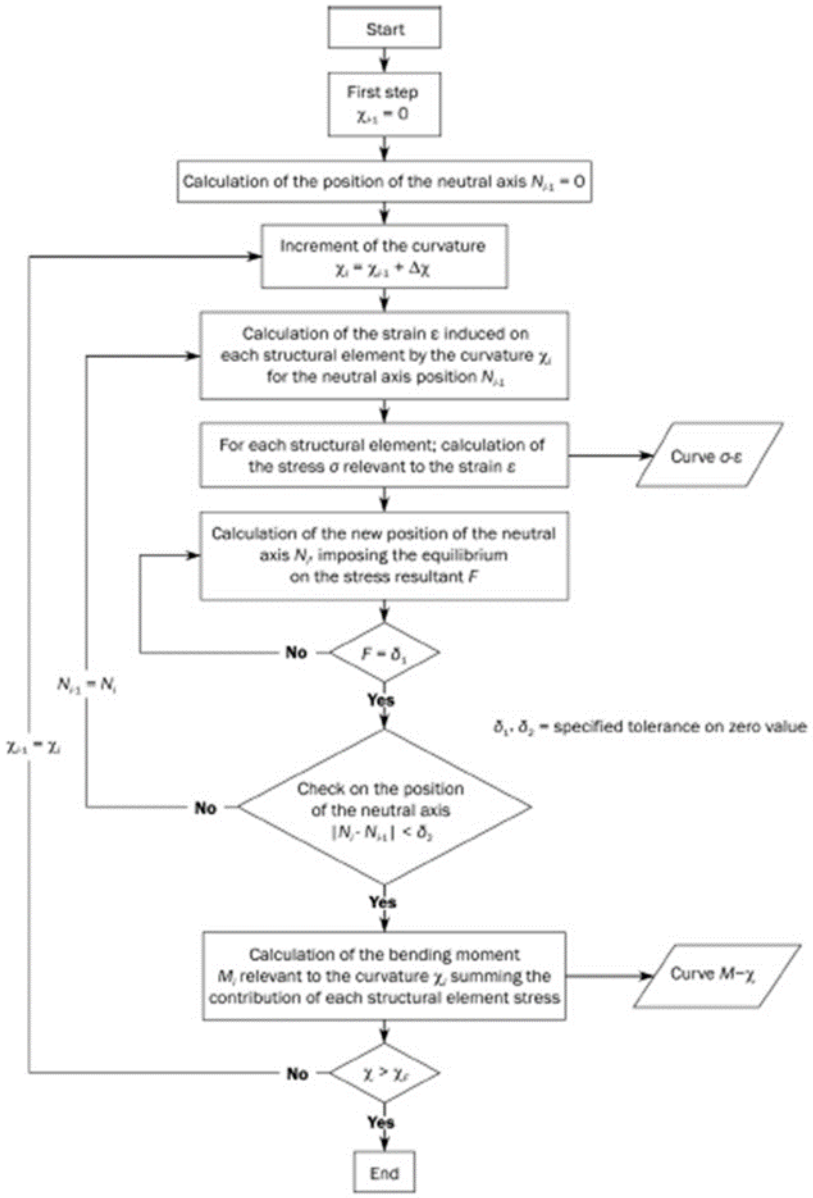


Рис.4 Алгоритм вычисления зависимости $M(\chi)$

5. Для данного равновесного состояния вычисляется значение изгибающего момента.

6. Увеличивается значение кривизны и п.п. 3-5 повторяются. Критерием остановки расчета является достижение величиной изгибающего момента максимальной величины.

4. Программное обеспечение

Рассмотренный выше алгоритм реализован в виде программного приложения Ultimate Strength (VB), модули которого написаны на языке Visual Basic 6.0. Исходная информация включает в себя четыре текстовых файла. В них описываются общие характеристики корпуса, продольные балки основного набора с примыкающей к ним обшивкой, «жесткие углы» и поперечно подкрепленные листовые элементы. В выходном текстовом файле для каждого значения кривизны оси корпуса в расчетном сечении приводятся величина вертикального изгибающего момента и отстояние нейтральной оси от основной плоскости по вертикали (аппликата).

5. Тестирование

Программное обеспечение протестировано на расчете предельных моментов для танкера типа «VLCC» и балкера типа «CAPESIZE» и показало хорошие результаты [1].

Для сравнения традиционной и пошагово-итерационной процедуры вычислены предельные изгибающие моменты для танкера «Владивосток» дедвейтом 15 000 т, расчетное поперечное сечение корпуса которого показано на рис.5 [4].

6. Анализ результатов

Результаты расчетов представлены в виде графиков изгибающего момента и аппликаты нейтральной оси в зависимости от ее кривизны, показанных на рис.6-7.

Сопоставление результатов расчета предельных изгибающих моментов традиционным методом и пошагово-итерационным методом, реализованным в приложении Ultimate Strength (VB) для танкера «Владивосток» приведено в таблице 2.

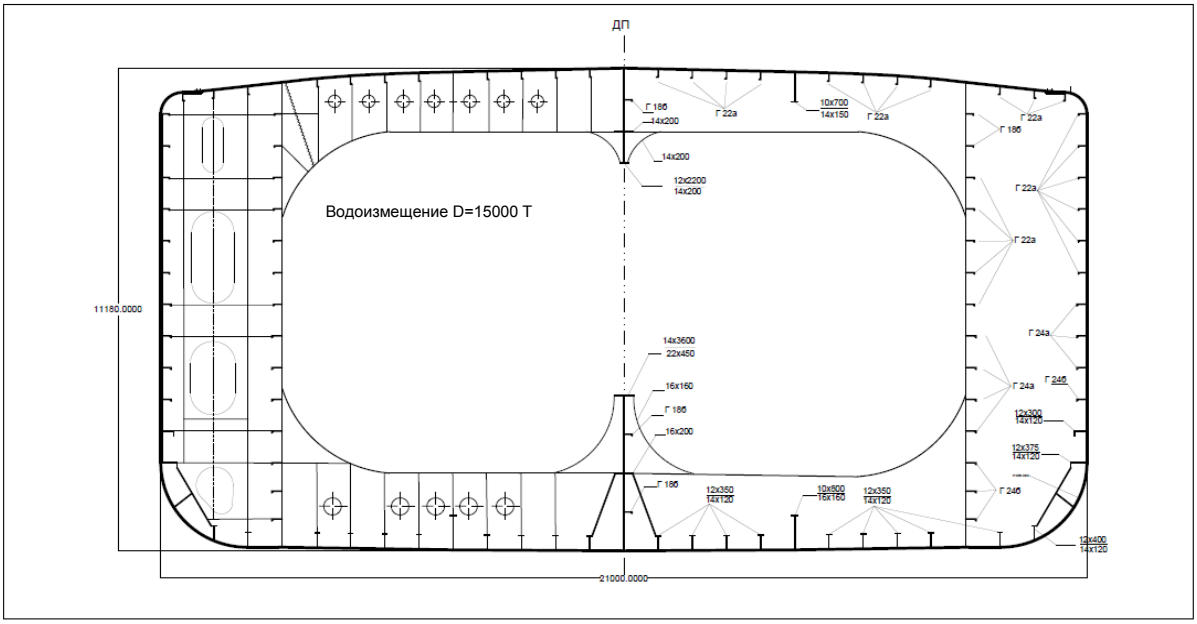


Рис 5. Поперечное сечение танкера «Владивосток»

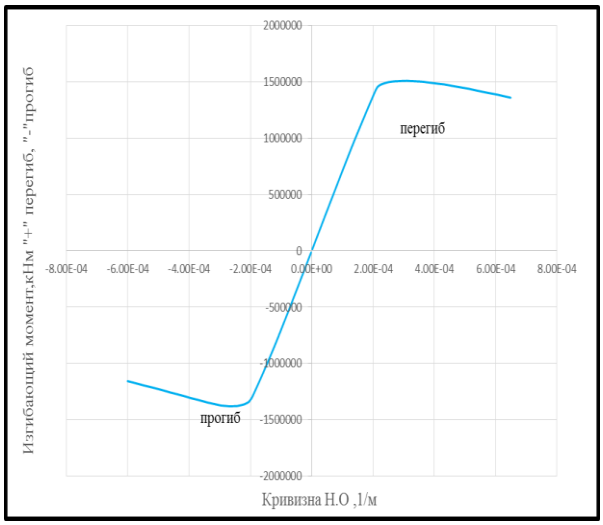


Рис.6 Кривая изгибающего момента

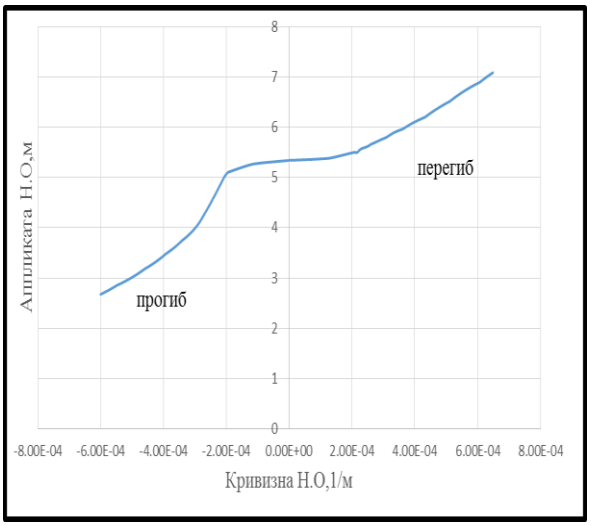


Рис.7 Кривая аппликаты нейтральной оси

Таблица 2

Сопоставление результатов традиционного и пошагово-итерационного методов

Тип судна	Предельные изгибающие моменты, кНм			
	Традиционный метод		Пошагово-итерационный метод	
	M_{US}	M_{UH}	M_{US}	M_{UH}
Танкер «Владивосток»	1 388 100	1 507 000	1 378 200	1 507 300

Заключение

Сравнение результатов расчетов предельных изгибающих моментов для танкера «Владивосток», полученные в третьем приближении традиционным методом Ю.А. Шиманского и пошагово-итерационным методом согласно Общим правилам МАКО показало, что оба рассмотренных метода вычисления предельных изгибающих моментов дают практически совпадающие значения предельных моментов.

Литература

1. Манухин В.А., Тряскин В.Н. Программное обеспечение расчетов предельной прочности транспортных судов по Правилам МАКО. Тез. докл. конф. по строит. механике корабля, посвящ. памяти проф. П.Ф. Папковича 23-24 дек. 2015 г. С.-Петербург, ФГУП КГНЦ им. акад. А.Н. Крылова, 2015. 35-36

2. Манухин В.А. Прочность корабля. Конспект лекций. СПбГМТУ, 2011. 239 с.

3. Манухин В.А., Родионов А.А., Упырев В.М. Проверочные расчеты общей прочности судна. Учебное пособие. СПбГМТУ, 2012. 115 с.

4. Лазарев В.Н., Глозман М.К. Альбом конструктивных мидель-шпангоутов транспортных судов. Учебное пособие. ЛКИ, 1970.138 с.

5. Jeom Kee Paik, Ge Wang, Bong Ju Kim, Anil Kumar Thayamballi. Ultimate Limit State Design of Ship Hulls. For presentation at the 2002 SNAME annual meeting. Boston. 2002. 24 p.

6. Ozguc, Ozgur and Barltrop, Nigel. Analysis on the hull girder ultimate strength of a bulk carrier using simplified method based on an incremental-iterative approach. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 130 (2). 2008. ISSN 0892-7219, 27 p.

7. Common Structural Rules. IACS. 2012.

Rereferences

1. Manukhin V.A., Tryaskin V.N. Programmnoe obespechenie raschetov predel'noy prochnosti transportnykh sudov po Pravilam MAKO. Tez. dokl. konf. po stroit. mekhanike korablya, posvyashch. pamyati prof. P.F. Papkovicha 23-24 dek. 2015 g. S.-Peterburg, FGUP KGNTs im. akad. A.N. Krylova, 2015. pp. 35-36

2. Manukhin V.A. Prochnost' korablya. Konspekt lektsiy. SPbGMTU, 2011. 239 p.

3. Manukhin V.A., Rodionov A.A., Upyrev V.M. Proverochnye raschety obshchey prochnosti sudna. Uchebnoe posobie. SPbGMTU, 2012. 115 p.

4. Lazarev V.N., Glozman M.K. Al'bom konstruktivnykh midel'-shpangoutov transportnykh sudov, Uchebnoe posobie. LKI ,1970. 138 p.

5. Jeom Kee Paik, Ge Wang, Bong Ju Kim, Anil Kumar Thayamballi. Ultimate Limit State Design of Ship Hulls. For presentation at the 2002 SNAME annual meeting. Boston. 2002. 24 p.

6. Ozguc, Ozgur and Barltrop, Nigel. Analysis on the hull girder ultimate strength of a bulk carrier using simplified method based on an incremental-iterative approach. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 130 (2). 2008. ISSN 0892-7219, 27 p.

7. Common Structural Rules. IACS. 2012

.

УДК 629.12.073.243.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМУЩАЮЩИХ СИЛ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ СОВМЕСТНОЙ КАЧКЕ ДВУХ СУДОВ НА МЕЛКОВОДЬЕ

Семенова Виктория Юрьевна
Д.т.н., профессор, профессор кафедры теории корабля
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10
тел: 8-905-229-71-98, e-mail: sem_viktorial@mail.ru

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

Аннотация

В статье рассматривается метод определения возмущающих сил , возникающих при совместной качке двух судов в условиях мелководья. Решение поставленной трехмерной потенциальной задачи осуществляется на основании метода интегральных уравнений с учетом граничных условий на смоченных поверхностях обоих судов. Представленное решение в отечественной практике является новым. Результаты расчетов, полученные авторами приводятся в сопоставлении с результатами, полученными Goo и Ali для совместной качки двух вертикальных цилиндров и двух прямоугольных барж. Показано очень хорошее согласование результатов между собой. Особое внимание уделяется исследованию влияния изменения расстояния между различными судами при их параллельном и последовательном расположении на амплитудные значения возмущающих сил, имеющих место при различных курсовых углах. Расчеты приведены для разных судов. Анализ полученных результатов показывает увеличение значений всех составляющих возмущающих сил и сдвиг их максимальных значений в область высших частот при расположении судов параллельно друг другу. Делается вывод о необходимости учета изменения расстояния между судами при определении всех шести составляющих возмущающих сил, действующих как на первое судно так и на второе.

Ключевые слова: метод интегральных уравнений, функция Грина, возмущающие силы, мелководье, качка.

THE DETERMINATION OF THE EXCITING FORCES DURING THE JOINT MOTIONS OF TWO SHIPS IN SHALLOW WATER.

Semenova Viktoriya Yur'evna
Dr.Sci.Tech., the professor, the professor of DEPARTMENT OF THEORY OF THE SHIP ,
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
tel: +7 (905) 229-71-98 e-mail: sem_viktorial@mail.ru
Aung Myo Thant
post-graduate student
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
tel: +7 (951) 661-25-01 e-mail: aungmyothant.amt@mail.ru

Abstract

This paper is about the method of determination of the exciting forces during the joint motions of two ships in shallow water. The solution of the three dimensional potential problem is realized by numerical method of the integral equations with the account of the boundary conditions on the wetted surfaces of both vessels. The solution presented in the national practice is new. The results of calculations obtained by the authors are compared with the results obtained by Goo and Ali for joint motion of the two vertical cylinders and the two rectangular barges. Shows a very good agreement of results among themselves. Special consideration is given to the investigation of the influence of the variation of distance between the ships, floating side-by-side and during their sequential arrangement on the amplitude values of the exciting forces that occur at different incident wave angles . Calculations of these values are presented for different ships. Analysis of the results shows an increase of the values of all components of the exciting forces and a shift of their maximum values at higher frequencies for the case of the location of the ships side-by-

side. The conclusion about the necessity of taking into account the changing of the distance between the ships in determining all six components of the exciting forces acting on the first vessel and the second is made.

Key words: method of the integral equations , Green function, exciting forces, shallow water, the motions of ship.

Введение

В статье авторов [1] был изложен метод определения гидродинамических коэффициентов присоединенных масс и демпфирования при совместной качке судов. В настоящей статье, являющейся продолжением работы [1], рассматривается метод определения возмущающих сил при совместной качке судов на мелководье. В отечественной практике задача определения возмущающих сил решалась с помощью оценки влияния эффекта экранирования первого судна на второе методом плоских сечений. В результате такой оценки предлагается главную часть возмущающих сил и момента, действующих на второе судно (отсчет ведется по направлению распространения волн) , рассчитывать с использованием соответствующих редукционных коэффициентов, учитывающих эффект экранирования. При этом коэффициенты экранирования, полученные для главной части возмущающих сил предлагается использовать и для дифракционной. Данный подход является приближенным.

В настоящей работе приводится метод расчета возмущающих сил, основанный на определении дифракционных потенциалов, учитывающих взаимодействие двух судов на мелководье на основании трехмерной потенциальной теории.

1.Описание расчетного метода

В соответствии с линейной теорией качки судна, потенциалы дифрагированного движения жидкости для судна А и судна В Φ_A и Φ_B можно представить в виде следующей суперпозиции:

$$\Phi_A = \varphi_{0\mathrm{A}}(\xi,\eta,\zeta)\cdot \mathrm{e}^{-i\omega t} + \\ + \varphi_{7\mathrm{AA}}(\xi,\eta,\zeta)\cdot \mathrm{e}^{-i\omega t} + \varphi_{7\mathrm{BA}}(\xi,\eta,\zeta)\cdot \mathrm{e}^{-i\omega t}; \quad (1)$$

$$\Phi_B = \varphi_{0\mathrm{B}}(\xi,\eta,\zeta)\cdot \mathrm{e}^{-i\omega t} + \\ + \varphi_{7\mathrm{BB}}(\xi,\eta,\zeta)\cdot \mathrm{e}^{-i\omega t} + \varphi_{7\mathrm{AB}}(\xi,\eta,\zeta)\cdot \mathrm{e}^{-i\omega t}, \quad (2)$$

где $\varphi_{0A}, \varphi_{0B}$-потенциалы набегающего волнения, действующего на судно А и судно В соответственно :

$$\varphi_{0A} = -i\frac{g}{\omega}\zeta_W \frac{\cosh\mu_0(\zeta_A + h)}{\cosh\mu_0 h} e^{i\mu_0(\xi_A\cos\beta+\eta_A\sin\beta)} \quad (3)$$

$$\varphi_{0B} = -i\frac{g}{\omega}\zeta_W \frac{\cosh\mu_0(\zeta_B + h)}{\cosh\mu_0 h} e^{i\mu_0(\xi_B\cos\beta+\eta_B\sin\beta)}$$

Потенциалы Φ_A и Φ_B должны удовлетворять уравнению Лапласа, граничным условиям на свободной и смоченной поверхностях, а также условиям на дне водоема:

$$\frac{\partial\Phi_A}{\partial\zeta} - \nu\Phi_A = 0; \qquad \frac{\partial\Phi_B}{\partial\zeta} - \nu\Phi_B = 0; \quad (4)$$

$$\nu = \frac{\omega^2}{g}$$

$$\frac{\partial\varphi_{7AA}}{\partial n} = -\frac{\partial\varphi_{0A}}{\partial n}; \qquad \frac{\partial\varphi_{7BA}}{\partial n} = 0; \\ \frac{\partial\varphi_{7AB}}{\partial n} = 0; \qquad \frac{\partial\varphi_{7BB}}{\partial n} = -\frac{\partial\varphi_{0B}}{\partial n}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial\Phi_A}{\partial\zeta} = 0, \qquad \zeta \to -h \\ \frac{\partial\Phi_B}{\partial\zeta} = 0, \qquad \zeta \to -h \quad (6)$$

Задача сводится к определению потенциалов, $\varphi_{7AA}, \varphi_{7BA}, \varphi_{7AB}, \varphi_{7BB}$, обусловленных дифрагированным движением жидкости и гидродинамическим взаимодействием судов .

Для ее решения используется теорема Грина, согласно которой каждый из искомых потенциалов можно представить как

$$\varphi_{7AA}(\xi,\eta,\zeta) = \frac{1}{4\pi}\iint_{S_A}\sigma_{7A}(\xi_1,\eta_1,\zeta_1)G_{AA}(\xi,\eta,\zeta,\xi_1,\eta_1,\zeta_1)dS_A; \quad (7)$$

$$\varphi_{7BA}(\xi,\eta,\zeta) = \frac{1}{4\pi}\iint_{S_B}\sigma_{7B}(\xi_1,\eta_1,\zeta_1)G_{BA}(\xi,\eta,\zeta,\xi_1,\eta_1,\zeta_1)dS_B; \quad (8)$$

$$\varphi_{7BB}(\xi,\eta,\zeta) = \frac{1}{4\pi}\iint_{S_B}\sigma_{7B}(\xi_1,\eta_1,\zeta_1)G_{BB}(\xi,\eta,\zeta,\xi_1,\eta_1,\zeta_1)dS_B; \quad (9)$$

$$\varphi_{7AB}(\xi,\eta,\zeta) = \frac{1}{4\pi}\iint_{S_A}\sigma_{7A}(\xi_1,\eta_1,\zeta_1)G_{AB}(\xi,\eta,\zeta,\xi_1,\eta_1,\zeta_1)dS_A; \quad (10)$$

Функция Грина, входящая в выражения (7)-(10) определяется, согласно Wehausen [5], для случая жидкости конечной глубины *h*, как

$$G(\xi,\eta,\zeta,\xi_1,\eta_1,\zeta_1) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + \\ + \int_0^\infty \frac{2(k+\nu)e^{-kh}\cosh k(\zeta+h)\cosh k(\zeta_1+h)}{k\sinh kh - \nu\cosh kh} J_0(kR)dk + \\ + j2\pi\frac{(\mu_0^2-\nu^2)\cosh\mu_0(\zeta+h)\cosh\mu_0(\zeta_1+h)}{(\mu_0^2-\nu^2)h+\nu} J_0(\mu_0 R), \quad (11)$$

Выражение для функции Грина (11) может быть представлено согласно John [4] в виде бесконечных рядов:

$$G(\xi,\eta,\zeta,\xi_1,\eta_1,\zeta_1) = \\ 2\pi\frac{(\nu^2-\mu_0^2)\cosh\mu_0(\zeta+h)\cosh\mu_0(\zeta_1+h)}{(\mu_0^2-\nu^2)h+\nu}(Y_0(\mu_0 R) - jJ_0(\mu_0 R)) + \\ + 4\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(\mu_k^2+\nu^2)\cos\mu_k(\zeta+h)\cos\mu_k(\zeta_1+h)}{(\mu_k^2+\nu^2)h-\nu} K_0(\mu_k R), \quad (12)$$

где μ_k –положительные корни уравнения

$$\mu_k \tan\mu_k h + \nu = 0 \quad (13)$$

При этом $\pi(k-\frac{1}{2}) \le \mu_k h \le \pi k$:

Выражение (12) для функции Грина более удобно для вычислений и используется в большинстве практических случаев.

Неизвестные интенсивности потенциалов определяются из решения следующей системы уравнений :

$$-\frac{1}{2}\sigma_{7A}(\xi,\eta,\zeta)+\frac{1}{4\pi}\iint_{S_A}\sigma_{7A}(\xi_1,\eta_1,\zeta_1)\frac{\partial G_{AA}}{\partial n}(\xi,\eta,\zeta,\xi_1,\eta_1,\zeta_1)dS_A+$$

$$+\frac{1}{4\pi}\iint_{S_B}\sigma_{7B}(\xi_1,\eta_1,\zeta_1)\frac{\partial G_{BA}}{\partial n}(\xi,\eta,\zeta,\xi_1,\eta_1,\zeta_1)dS_B=-\frac{\partial\varphi_{oA}}{\partial n}; \quad (14)$$

$$-\frac{1}{2}\sigma_{7B}(\xi,\eta,\zeta)+\frac{1}{4\pi}\iint_{S_A}\sigma_{7A}(\xi_1,\eta_1,\zeta_1)\frac{\partial G_{AB}}{\partial n}(\xi,\eta,\zeta,\xi_1,\eta_1,\zeta_1)dS_A+$$

$$+\frac{1}{4\pi}\iint_{S_B}\sigma_{7B}(\xi_1,\eta_1,\zeta_1)\frac{\partial G_{BB}}{\partial n}(\xi,\eta,\zeta,\xi_1,\eta_1,\zeta_1)dS_B=-\frac{\partial\varphi_{oB}}{\partial n}.$$

Возмущающие силы определяются согласно формулам:

$$F_{Ai}=-\rho i\omega_K e^{-i\omega Kt}\iint_S(\varphi_{0A}+\varphi_{7AA}+\varphi_{7BA})n_i dS_A- \quad (15)$$

$$-\rho e^{-i\omega Kt}U\iint_S\frac{\partial}{\partial\xi}(\varphi_{0A}+\varphi_{7AA}+\varphi_{7BA})n_i dS_A$$

$$F_{Bi}=-\rho i\omega_K e^{-i\omega Kt}\iint_S(\varphi_{0B}+\varphi_{7BB}+\varphi_{7AB})n_i dS_B- \quad (16)$$

$$-\rho e^{-i\omega Kt}U\iint_S\frac{\partial}{\partial\xi}(\varphi_{0B}+\varphi_{7BB}+\varphi_{7AB})n_i dS_B$$

где ω_K -кажущаяся частота.

2.Анализ результатов

На основании изложенного метода была разработана программа расчета возмущающих сил при совместной качке двух судов.

В целях апробации, полученные результаты продольно-горизонтальных и вертикальных возмущающих сил были сопоставлены с результатами Goo [3], полученными для совместной качки двух вертикальных цилиндров (рис.1-2).

Результаты расчетов поперечно-горизонтальных возмущающих сил и кренящих моментов, возникающих при совместной качке двух прямоугольных барж были сопоставлены с расчетами Ali [2] для различных расстояний между ними (рис.3-4).

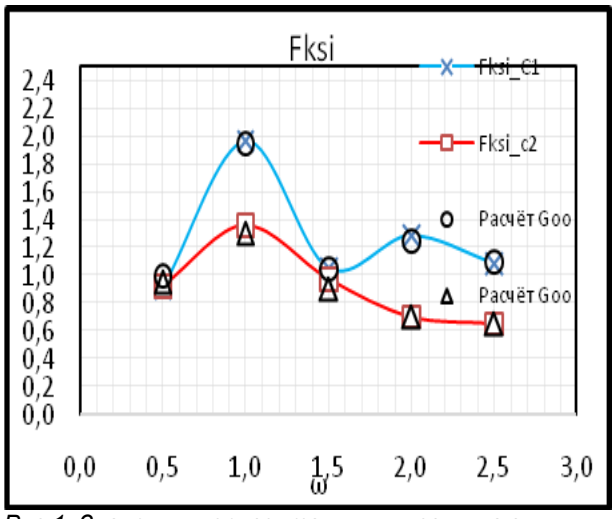


Рис.1. Значения горизонтальных возмущающих сил при совместной качке двух вертикальных цилиндров в сравнении с Goo

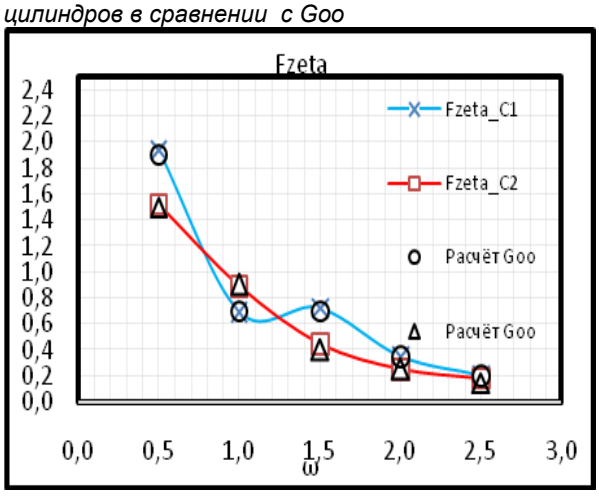
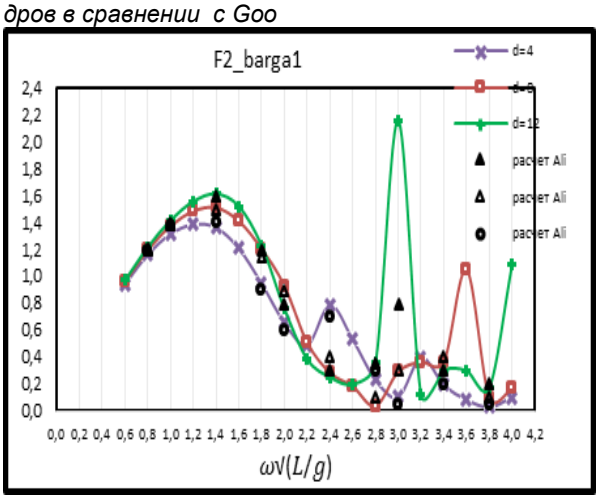


Рис.2 Значения вертикальных возмущающих сил при совместной качке двух вертикальных цилиндров в сравнении с Goo



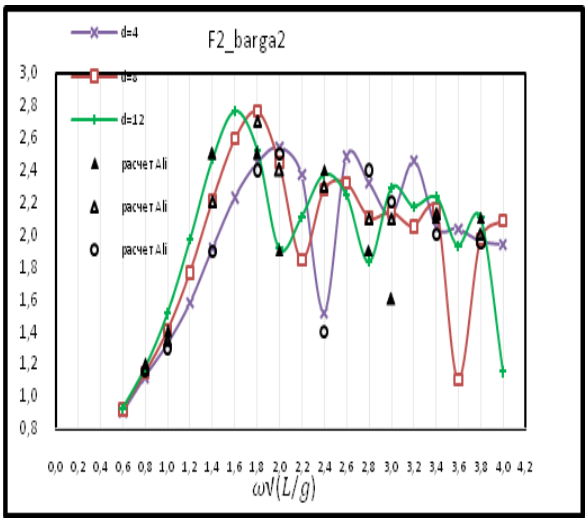


Рис.3. Значения возмущающих поперечно-горизонтальных сил, возникающих при совместной качке двух барж

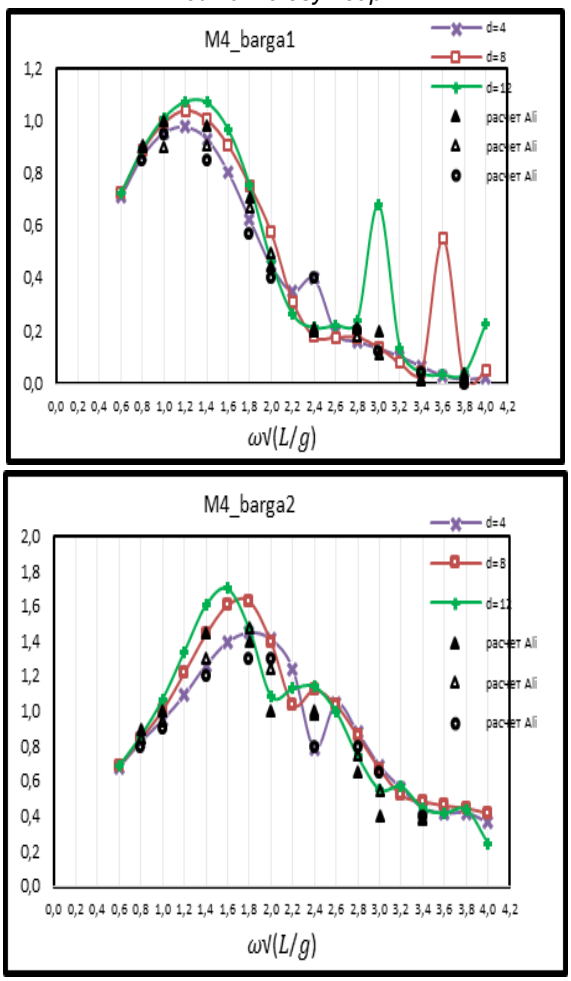


Рис.4. Значения возмущающих моментов, возникающих при совместной качке двух барж

Из приведенных сопоставлений видно очень хорошее согласование результатов при различных расстояниях между объектами.

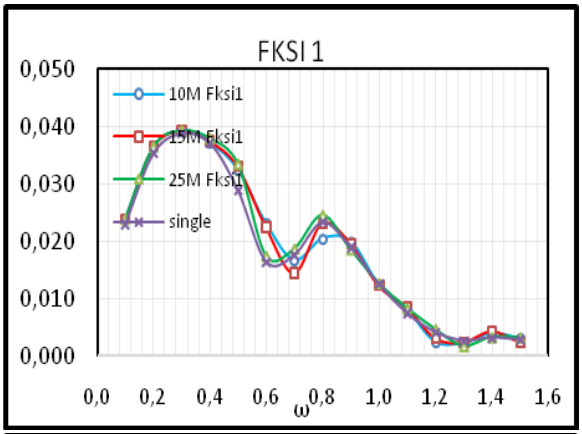
Расчеты возмущающих сил проводились для двух пар судов: баржа(L=150 м ,B= 50 м, T=10 м) и сухогруз «Стахановец Котов», лихтеровоз «Алексей Косыгин» и сухогруз «Новгород»; для трех курсовых углов : 90,135,180 при различных расстояниях между судами и различными глубинами. Характерные результаты расчетов приведены на рис 5-8 в сравнении с амплитудными значениями возмущающих сил для изолированных судов.

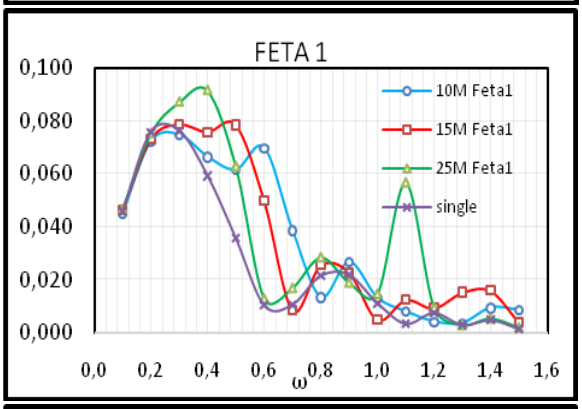
Полученные результаты для двух пар судов показали, что при расположении обоих судов лагом характерно увеличение значений вертикальных и горизонтальных сил в зоне частот $\omega<0,6$ и их значительное уменьшение при $\omega>0,6$ по сравнению с соответствующими значениями для изолированного судна.

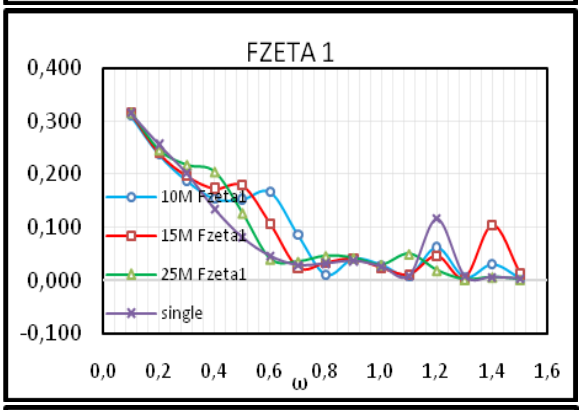
Значения возмущающих кренящих моментов при совместной качке для судна , расположенного с подветренной стороны в зоне частот $\omega>0,8$ в 3-4 раза меньше момента для изолированного судна . Для судна, расположенного с наветренной стороны значения кренящих моментов в зоне частот $\omega<1$ больше значений соответствующих моментов для изолированного судна. При $\omega>1$ амплитудные значения моментов перестают зависеть от величины расстояния между судами.

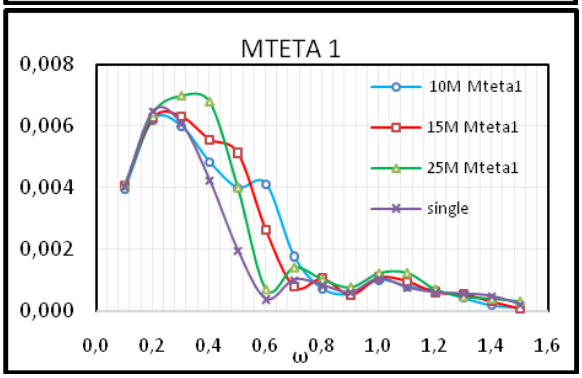
Для всех составляющих сил как первого, так и второго судна характерно наличие максимумов , значения которых увеличиваются при уменьшении расстояния между судами. При этом происходит сдвиг данных максимумов в область больших значений частот.

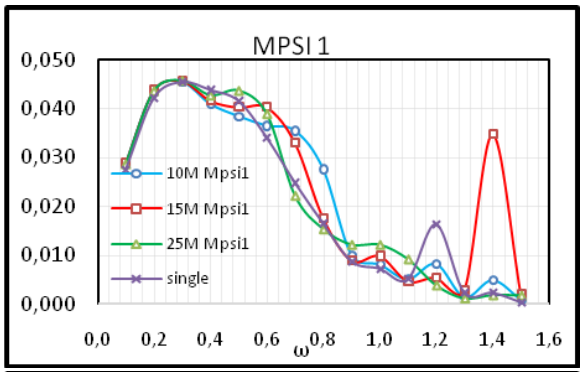
На косом встречном волнении изменение расстояния при совместной качке между судами влияет на все шесть составляющих возмущающих сил второго судна (рис.6) . Для судна, расположенного с подветренной стороны (баржи), изменение расстояния влияет в большей степени на поперечно-горизонтальную силу, вертикальную силу и кренящий возмущающий момент. Все составляющие сил увеличиваются при уменьшении расстояния между судами по сравнению с соответствующими значениями для изолированных судов. Для судна , расположенного с наветренной стороны (Стахановец Котов) , изменение расстояния значительно влияет на все шесть составляющих возмущающих сил. Так, при наименьшем расстоянии d=10 м значения горизонтальных и вертикальных сил могут превышать в 3-4 раза соответствующие значения для изолированного судна (рис.7)











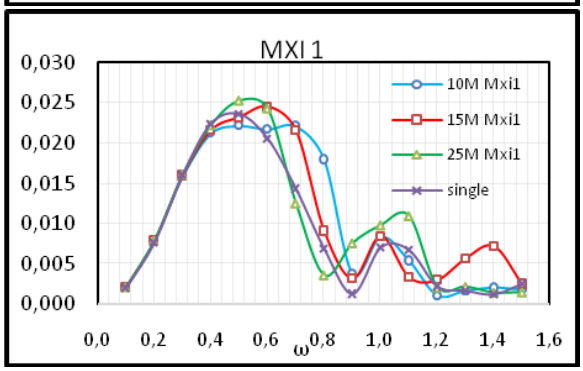
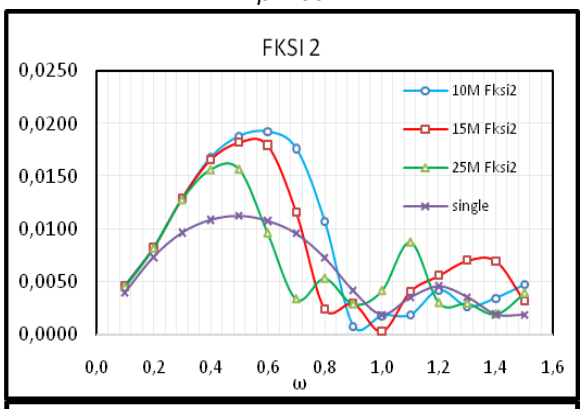
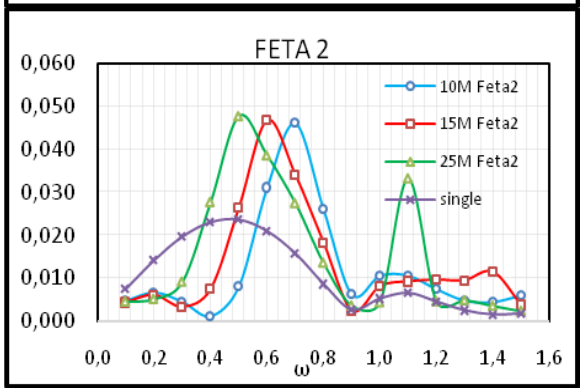


Рис.5. Значения возмущающих сил и моментов для баржи при глубине h=15м и курсовом угле β=135





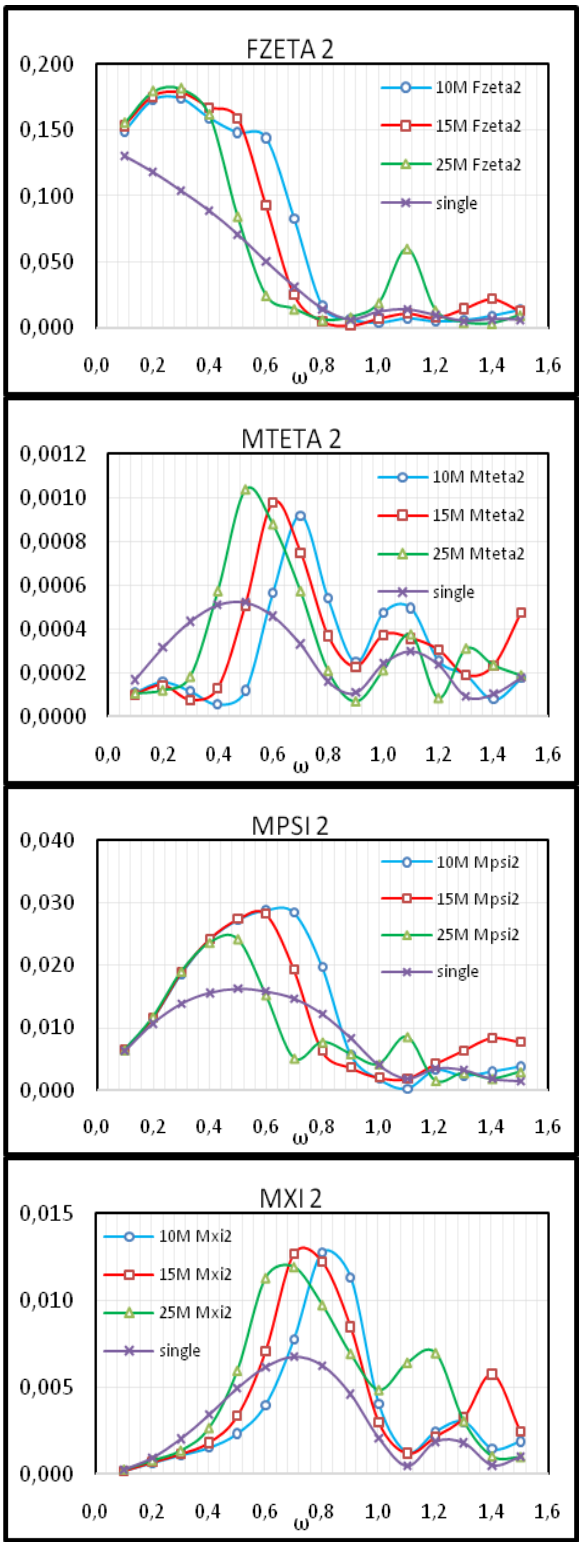
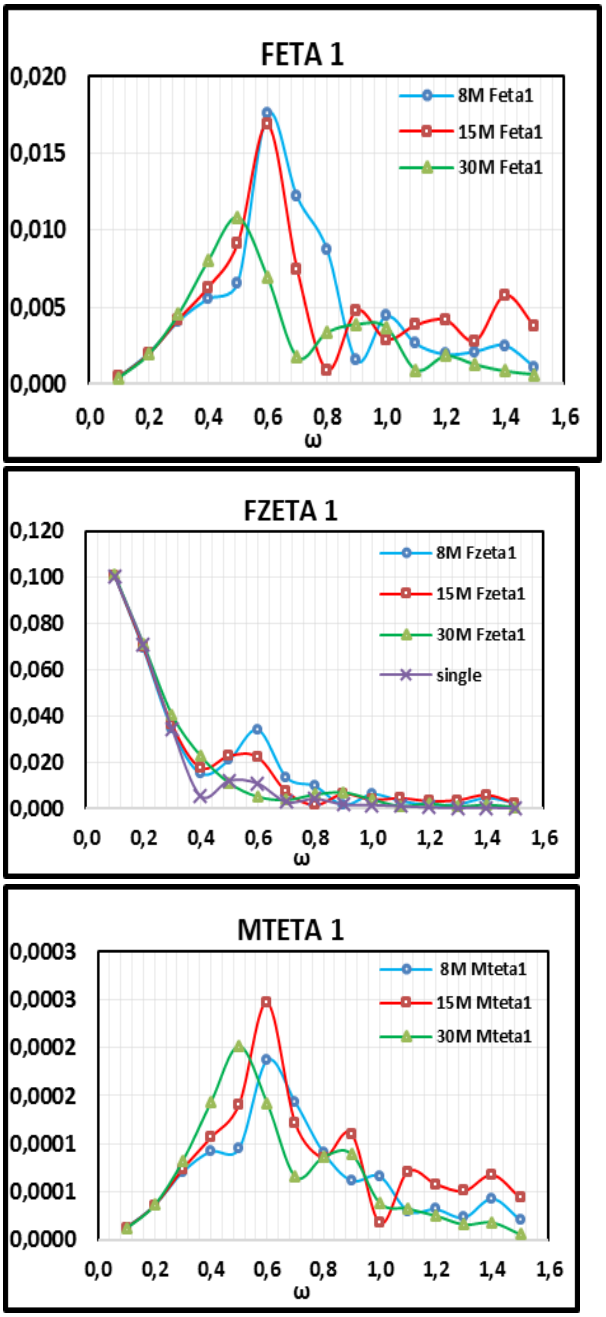


Рис.6 Значения возмущающих сил и моментов для сухогруза Стахановец Котов при глубине h=15м и курсовом угле β=135

На встречном волнении при совместной качке из-за гидродинамического взаимодействия судов возникают поперечная возмущающая сила, кренящий и разворачивающий моменты. Их амплитуды увеличиваются при уменьшении расстояния между судами (рис.7,8). Также как и в предыдущих случаях, происходит сдвиг максимальных значений в область больших частот.

В меньшей степени изменение расстояния между судами влияет на продольную, вертикальную силы и дифферентующий момент первого судна (рис.7). Амплитудные значения перечисленных реакций для второго судна(меньшего по размерам) увеличиваются при уменьшении расстояния и могут быть в 3-5 раз больше соответствующих значений для изолированного судна (рис.8).



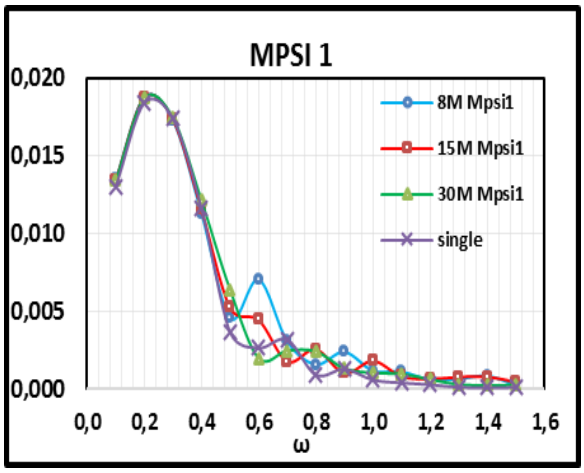
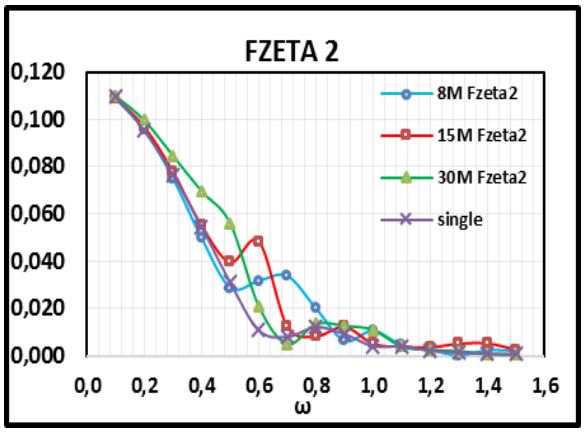
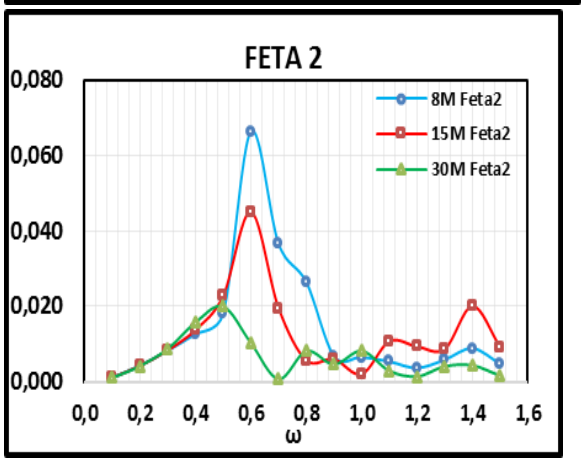
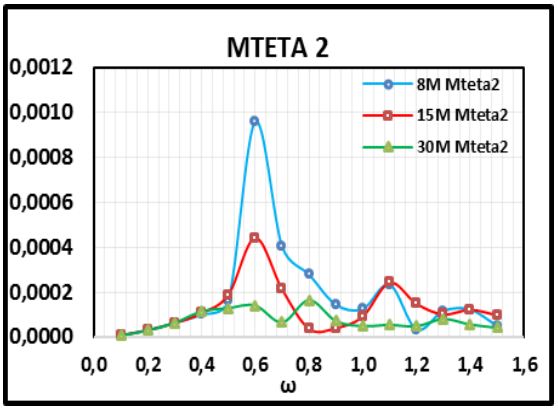
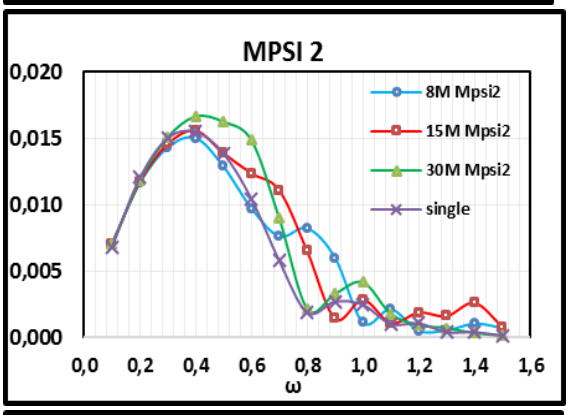


Рис.7. Значения возмущающих сил и моментов для лихтеровоза Алексей Косыгин на встечном волнении при изменении расстояния и глубине h=20 м.









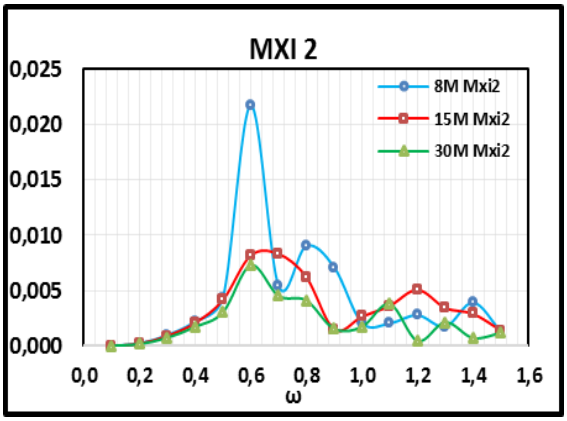


Рис.8. Значения возмущающих сил и моментов для сухогруза Новгород на встечном волнении при изменении расстояния и глубине h=20м

Проведенный анализ расчетов возмущающих сил при последовательном расположении судов показал, что изменение расстояния между судами не влияет на их значения.

Выводы

Вышеизложенный метод позволяет рассчитывать возмущающие силы при произвольном расположении судов друг относительно друга и точно учитывать их гидродинамическое взаимодействие в рамках потенциальной теории.

Проведенное исследование влияния изменения расстояния между судами показало, что :

1. уменьшение расстояния между судами приводит к значительному увеличению максимальных значений возмущающих сил и моментов и их сдвигу в сторону больших частот по сравнению с возму-

щающими силами, действующими на изолированное судно.

2. наибольшее влияние изменения расстояния на амплитудные значения возмущающих сил имеет место при расположении обоих судов лагом и параллельно друг другу. При этом, в большей степени увеличиваются возмущающие силы , действующие на меньшее судно, расположенное с наветренной стороны.

3. на встречном волнении из-за гидродинамического взаимодействия судов возникают горизонтальные возмущающие силы и кренящие и разворачивающие моменты , отсутствующие в случае изолированного судна. Амплитудные значения данных гидродинамических реакций увеличиваются при уменьшении расстояния между судами.

Таким образом, для точной оценки амплитуд совместной качки судов необходимо рассчитывать все шесть составляющих возмущающих сил для каждого судна с учетом их гидродинамического взаимодействия.

Литература

1. Семенова В.Ю., Аунг Мьо Тхант (2015) . Определение гидродинамических коэффициентов присоединенных масс и демпфирования при совместной качке двух судов. Морские интеллектуальные технологии, N4(30), т.1, стр.9-15
2. Ali M.T., Inoue Y.(2005) On hydrodynamic interaction between two rectangular barges floating side-by-side in regular waves. Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering, 28-30 December 2005? Dhaka, Bangladesh
3**.** .Goo J., Yoshida K.(1989) Hydrodynamic interaction between multiple three dimensional bodies of arbitrary shape in waves. Journal of the society of Naval Architects of Japan , 165,pp.193-2024.
4.John F.(1950) On the motion of floating bodies. Comm.Pure and Appl. Math., v. 3, p. 45-101
5. Wehausen J.V., Laitone E.V.(1960) Surface waves. Encyclopedia of Physics. Berlin, Springer-Verlag, , v.9, p.446-778.

References

1.Semenova V.Yu., Aung M'o Tkhant .(2015) Opredelenie gidrodinamicheskikh koeffitsientov pri-soedinennykh mass i dempfirovaniya pri sovmestnoy kachke dvukh sudov. Morskie intellektual'nye tekhnologii, N4(30), t., str.9-15
2. Ali M.T., Inoue Y.(2005) On hydrodynamic interaction between two rectangular barges floating side-by-side in regular waves. Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering, 28-30 December 2005? Dhaka, Bangladesh
3**.** Goo J., Yoshida K.(1989) Hydrodynamic interaction between multiple three dimensional bodies of arbitrary shape in waves. Journal of the society of Naval Architects of Japan , 165,pp.193-2024.
4.John F.(1950) On the motion of floating bodies. Comm.Pure and Appl. Math., v. 3, p. 45-101
5. Wehausen J.V., Laitone E.V.(1960) Surface waves. Encyclopedia of Physics. Berlin, Springer-Verlag, , v.9, p.446-778.

УДК 629.12.073.243.4

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

Семенова Виктория Юрьевна
Д.т.н., профессор, профессор кафедры теории корабля
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10
e-mail: sem_viktoria@mail.ru

Киав Тхура
Аспирант
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10
тел.8-904-6126-61-68; e-mail: ktra29188@gmail.com

Аннотация

В статье рассматривается метод расчета нелинейных сил второго порядка, обусловленных разностью частот и возникающих при различных видах колебаний контура на бихроматическом волнении. Возникновение данных сил обусловлено взаимодействием набегающего, диффрагированного и вынужденного волнения. Используемый расчетный метод представляет собой комбинированный метод интегральных уравнений Гельмгольца. При этом авторами осуществляется точный учет нелинейного граничного условия на свободной поверхности жидкости. Результаты расчетов, полученные авторами , сопоставляются с результатами расчетов, полученными по другому методу . Показано убедительное согласование результатов между собой. Приводятся результаты исследования влияния на нелинейные силы геометрических параметров контуров, таких как коэффициента полноты и отношения осадки к полуширине. Показано значительное увеличение нелинейных вертикальных сил при уменьшении коэффициента полноты и отношения осадки к полуширине и горизонтальных сил при увеличении коэффициента полноты и отношения осадки к полуширине Делается вывод о необходимости учета всех составляющих нелинейных сил при построении методов расчета качки судна на нерегулярном волнении.

Ключевые слова : нелинейные силы второго порядка, метод интегральных уравнений, бихроматическое волнение, условие на свободной поверхности, разность частот.

THE DETERMINATION OF NONLINEAR FORCES OF THE SECOND ORDER DUE TO THE DIFFERENCE OF FREQUENCIES DURING THE SWAY, HEAVE AND ROLL OF A TWO-DIMENSIONAL BODY ON THE BICHROMATIC WAVES

Semenova Viktoriya Yur'evna
Dr.Sci.Tech., the professor, the professor of DEPARTMENT OF THEORY OF THE SHIP ,
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
tel: +7 (905) 229-71-98 e-mail: sem_viktoria@mail.ru
Kyaw Thura
post-graduate student
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
tel:+7(904)612-61-68 e-mail:ktra29188@gmail.com

Abstract

The article deals with the method of calculation of non-linear second-order forces due to the difference of frequencies which arise during the sway, heav and roll on the bichromatic waves. The emergence of these forces is due to the interaction of the incident, diffracted and forced waves . The calculation method used is a combined method of Helmholtz integral equations. At the same authors carried out an accurate account of non-linear boundary condition

at the free surface of the liquid. The calculation results obtained by the authors, are compared with the calculation results obtained by another method. Shown convincing correlation of results between them. The results of the study of the influence of the geometric parameters on nonlinear forces, such as the coefficient of sectional area and the ratio of the draft to half-beam are presented. Obtained results show a significant increasing of nonlinear vertical forces with the decreasing of the sectional area's coefficient and the ratio of the draft to half-beam and increasing of nonlinear horizontal forces with the increasing of the sectional area's coefficient and the ratio of the draft to half-beam depth. The conclusion about the necessity of taking into account all components of nonlinear forces in the elaboration of the methods of calculation of the motions of the ship on an irregular waves is made.

Key words: nonlinear forces of the second order , method of integral equations, bichromatic waves , nonlinear boundary condition at the free surface of the liquid, the difference of frequencies

Введение

Для точного расчета нелинейных сил второго порядка, обусловленных разностью частот, необходимо определение не только их чисто дифракционных составляющих, но и сил, обусловленных взаимодействием набегающего, дифрагированного волнения и волнения, вызванного отдельными видами колебаний контура. Метод определения нелинейных дифракционных сил изложен в работе авторов [1] . В настоящей статье на основании данного метода решается задача определения нелинейных гидродинамических сил и моментов, обусловленных разностью частот и возникающих при вертикальных, поперечно-горизонтальных и бортовых колебаниях шпангоутных контуров на бихроматическом набегающем волнении.

1. Описание метода расчета

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

$$\begin{aligned} \eta_g(t) &= \eta_{m1}e^{-j\omega_1 t} + \eta_{m2}e^{-j\omega 2t}; \\ \zeta_g(t) &= \zeta_{m1}e^{-j\omega_1 t} + \zeta_{m2}e^{-j\omega 2t}; \\ \theta(t) &= \theta_{m1}e^{-j\omega_1 t} + \theta_{m2}e^{-j\omega 2t} \end{aligned} \quad (1)$$

Используя метод малого параметра, потенциал скорости движения жидкости второго порядка вызванный взаимодействием поперечно-горизонтальных, вертикальных и бортовых колебаний с волнением и обусловленный разностью частот, будет иметь вид:

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

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

$$\frac{\partial\phi_{37}^{(2)}}{\partial n} = -\frac{j}{2}\frac{\partial^2\bar{\phi}_{7_2}^{(1)}}{\partial s\partial\eta} + \frac{j}{2}\frac{\partial^2\phi_{7_1}^{(1)}}{\partial s\partial\eta};$$

$$\frac{\partial\phi_{27}^{(2)}}{\partial n} = \frac{j}{2}\frac{\partial^2\bar{\phi}_{7_2}^{(1)}}{\partial s\partial\zeta} - \frac{j}{2}\frac{\partial^2\phi_{7_1}^{(1)}}{\partial s\partial\zeta};$$

$$\frac{\partial\phi_{47}^{(2)}}{\partial n} = -\frac{j}{2}\left\{\frac{\partial\bar{\phi}_{7_2}^{(1)}}{\partial s} + \eta\frac{\partial^2\bar{\phi}_{7_2}^{(1)}}{\partial s\partial\eta} + \zeta\frac{\partial^2\bar{\phi}_{7_2}^{(1)}}{\partial s\partial\zeta}\right\} + \frac{j}{2}\left\{\frac{\partial\phi_{7_1}^{(1)}}{\partial s} + \eta\frac{\partial^2\phi_{7_1}^{(1)}}{\partial s\partial\eta} + \zeta\frac{\partial^2\phi_{7_1}^{(1)}}{\partial s\partial\zeta}\right\}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial\phi_{m7}^{(2)}}{\partial\zeta} - K_3\phi_{m7}^{(2)} = M_{m7}^{(2)} = -\frac{j\omega_1}{2g}\left(\left(\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)}\right)\left(\frac{\partial^2\bar{\phi}_{m2}^{(1)}}{\partial\zeta^2} - K_2\frac{\partial\bar{\phi}_{m2}^{(1)}}{\partial\zeta}\right) + \left(\phi_{m1}^{(1)}\left(\frac{\partial^2\bar{\phi}_{72}^{(1)}}{\partial\zeta^2} - K_2\frac{\partial\bar{\phi}_{72}^{(1)}}{\partial\zeta}\right)\right) + \frac{j\omega_2}{2g}\left(\left(\bar{\phi}_{m2}^{(1)}\right)\left(\frac{\partial^2\phi_{71}^{(1)}}{\partial\zeta^2} - K_1\frac{\partial\phi_{71}^{(1)}}{\partial\zeta}\right) + \left(\bar{\phi}_{02}^{(1)} + \bar{\phi}_{72}^{(1)}\right)\left(\frac{\partial^2\phi_{m1}^{(1)}}{\partial\zeta^2} - K_1\frac{\partial\phi_{m1}^{(1)}}{\partial\zeta}\right)\right) + \frac{j(\omega_1-\omega_2)}{g}\left(\frac{\partial\left(\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)}\right)}{\partial\eta}\frac{\partial\left(\bar{\phi}_{m2}^{(1)}\right)}{\partial\eta} + \frac{\partial\left(\phi_{01}^{(1)} + \phi_{71}^{(1)}\right)}{\partial\zeta}\frac{\partial\left(\bar{\phi}_{m2}^{(1)}\right)}{\partial\zeta} + \frac{\partial\left(\bar{\phi}_{02}^{(1)} + \bar{\phi}_{72}^{(1)}\right)}{\partial\eta}\frac{\partial\left(\phi_{m1}^{(1)}\right)}{\partial\eta} + \frac{\partial\left(\bar{\phi}_{02}^{(1)} + \bar{\phi}_{72}^{(1)}\right)}{\partial\zeta}\frac{\partial\left(\phi_{m1}^{(1)}\right)}{\partial\zeta}\right); \quad (4)$$

где

$$K_1 = \frac{(\omega_1)^2}{g}; \qquad K_2 = \frac{(\omega_2)^2}{g}; \qquad K_3 = \frac{(\omega_1-\omega_2)^2}{g}.$$

$\phi_{7i}^{(1)}$ -дифракционные потенциалы первого порядка, определяемые согласно методу [2],

$\phi_{0i}^{(1)}$ -потенциал набегающего волнения

$$\phi_{0i}^{(1)} = j\frac{g}{\omega_i}a_{Wi}\tilde{\phi}_{0i}^{(1)}; \quad (5)$$

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

В настоящей работе для определения всех потенциалов второго порядка используется комбинированный метод интегральных уравнений Гельмгольца [3], основанный на введении следующих комбинаций:

$$\phi_{m7}^{(2)} = \phi_{m71} + \phi_{m72}, , \quad (6)$$

где потенциалы ϕ_{m71} учитывают граничное условие на свободной поверхности , а ϕ_{m72} -на контуре. Тогда, можно записать:

$$\frac{\partial\phi_{m72}}{\partial n} = \frac{\partial\phi_{m7}^{(2)}}{\partial n} - \frac{\partial\phi_{m71}}{\partial n} \quad (4) \quad (7)$$

Предел граничного условия на свободной поверхности жидкости (4) на бесконечном удалении

от контура для каждого вида колебаний представляет собой осциллирующую функцию. В связи с этим, для определения функций ϕ_{m71} используется модифицированный метод Вехаузена-Лайтона [4], согласно которому:

$$\phi_{m71}+i\tilde{\phi}_{m71}=\frac{\left(\operatorname{Re}A_{m7}+j\operatorname{Im}A_{m7}\right)}{K'-K_3}\left[e^{jK'\eta_1}+ije^{jK'\eta_1}\right]$$
$$-j\frac{\left(\operatorname{Re}A_{m7}+j\operatorname{Im}A_{m7}\right)}{\pi}\cdot\left[\frac{e^{iK'\tilde{\zeta}}E_1(iK'\tilde{\zeta})}{K'+K_3}+\frac{e^{-iK'\tilde{\zeta}}E_1(-iK'\tilde{\zeta})}{K'-K_3}\right]+ \quad (8)$$
$$+2i\int_{\eta_1}^{\infty}\tilde{M}_{m7}e^{-iK_3(\tilde{\zeta}-l)}dl+\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{M}_{m7}e^{-iK_3(\tilde{\zeta}-l)}E_1\left(-iK_3(\tilde{\zeta}-l)\right)dl+$$
$$+(j-i)\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{M}_{m7}e^{-iK_3(\tilde{\zeta}-l)}dl,$$

где

$$\tilde{M}_{m7}=M_{m7}^{(2)}-\left(\operatorname{Re}A_{m7}+j\operatorname{Im}A_{m7}\right)\cdot e^{jK'\eta_1};$$
$$K'=K_1-K_2; \quad (9)$$

$$A_{m7}=A_{m7S}+A_{m7A},$$

где

$$A_{m7S}=-\frac{j}{g}(\omega_1-\omega_2)K_1K_2\left(-jA_{m1}e^{j(\delta_{m1})}+jA_{m2}e^{-j(\delta_{m2})}+\right.$$
$$\left.+2A_{m2}A_{71}e^{j(\delta_{71}-\delta_{m2})}+2A_{m1}A_{72}e^{j(\delta_{m1}-\delta_{72})}\right)$$
$$A_{m7A}=-\frac{j}{g}(\omega_1-\omega_2)K_1K_2\left(-jA_{m1}e^{j(\delta_{m1})}+jA_{m2}e^{-j(\delta_{m2})}+\right.$$
$$\left.+2jA_{m2}A_{71}e^{j(\delta_{71}-\delta_{m2})}-2jA_{m1}A_{72}e^{j(\delta_{m1}-\delta_{72})}\right) \quad (10)$$

В выражениях (10) $A_m, A_{7i}, \delta_m, \delta_{7i}$ - представляют собой амплитудные и фазовые характеристики соответствующих потенциалов первого порядка;E_1-интегрально-показательная функция. Применение вышеизложенного подхода позволяет устранить осцилляцию функций и точно учесть граничное условие на свободной поверхности.

Все потенциалы второго порядка ϕ_{m72} определяются на основании решения следующей системы интегральных уравнений :

$$-\phi_{m72}(\eta,\zeta)+\frac{1}{2\pi}\int_{-L}^{L}\phi_{m72}(\eta_1,\zeta_1)\frac{\partial G}{\partial n}(\eta,\zeta,\eta_1,\zeta_1)ds= \quad (11)$$
$$=\frac{1}{2\pi}\int_{-L}^{L}\frac{\partial\phi_{m72}}{\partial n}\cdot G(\eta,\zeta,\eta_1,\zeta_1)ds$$

где функция Грина имеет вид

$$G(\eta,\zeta,\eta_1,\zeta_1)=\operatorname{Re}_j\left\{\log\left(\frac{\tilde{\zeta}-\zeta^*}{\tilde{\zeta}-\bar{\zeta}^*}\right)+2\int_0^{\infty}\frac{e^{-jk(\tilde{\zeta}-\bar{\zeta}^*)}}{K_3-k}dk-,\right.$$
$$\left.-j2\pi e^{-jK_3(\tilde{\zeta}-\bar{\zeta}^*)}\right\} \quad (12)$$
$$\tilde{\zeta}=\eta+j\zeta; \quad \zeta^*=\eta_1+j\zeta_1; \quad \bar{\zeta}^*=\eta_1-j\zeta_1$$

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

$$p_{27}^{(2)}=-\rho\left(-j(\omega_1-\omega_2)\phi_{27}^{(2)}+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial\left(\phi_{21}^{(1)}\right)}{\partial\eta}\frac{\partial\left(\bar{\phi}_{02}^{(1)}+\bar{\phi}_{72}^{(1)}\right)}{\partial\eta}+\right.\right.$$
$$+\frac{\partial\left(\phi_{01}^{(1)}+\phi_{71}^{(1)}\right)}{\partial\zeta}\frac{\partial\left(\bar{\phi}_{22}^{(1)}\right)}{\partial\zeta}+\frac{\partial\left(\phi_{21}^{(1)}\right)}{\partial\zeta}\frac{\partial\left(\bar{\phi}_{02}^{(1)}+\bar{\phi}_{72}^{(1)}\right)}{\partial\zeta} \quad (13)$$
$$\left.+\frac{\partial\left(\phi_{01}^{(1)}+\phi_{71}^{(1)}\right)}{\partial\eta}\frac{\partial\left(\bar{\phi}_{22}^{(1)}\right)}{\partial\eta}\right)-$$
$$\left.-\frac{b}{2}\left(\omega_1\frac{\partial\left(\phi_{01}^{(1)}+\phi_{71}^{(1)}\right)}{\partial\eta}+\omega_2\frac{\partial\left(\bar{\phi}_{02}^{(1)}+\bar{\phi}_{72}^{(1)}\right)}{\partial\eta}\right)\right);$$

$$p_{37}^{(2)}=-\rho\left(-j(\omega_1-\omega_2)\phi_{37}^{(2)}+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial\left(\phi_{31}^{(1)}\right)}{\partial\eta}\frac{\partial\left(\bar{\phi}_{02}^{(1)}+\bar{\phi}_{72}^{(1)}\right)}{\partial\eta}+\right.\right.$$
$$+\frac{\partial\left(\phi_{01}^{(1)}+\phi_{71}^{(1)}\right)}{\partial\zeta}\frac{\partial\left(\bar{\phi}_{32}^{(1)}\right)}{\partial\zeta}+\frac{\partial\left(\phi_{31}^{(1)}\right)}{\partial\zeta}\frac{\partial\left(\bar{\phi}_{02}^{(1)}+\bar{\phi}_{72}^{(1)}\right)}{\partial\zeta}+ \quad (14)$$
$$\left.+\frac{\partial\left(\phi_{01}^{(1)}+\phi_{71}^{(1)}\right)}{\partial\eta}\frac{\partial\left(\bar{\phi}_{32}^{(1)}\right)}{\partial\eta}\right)-$$
$$\left.-\frac{b}{2}\left(\omega_1\frac{\partial\left(\phi_{01}^{(1)}+\phi_{71}^{(1)}\right)}{\partial\zeta}+\omega_2\frac{\partial\left(\bar{\phi}_{02}^{(1)}+\bar{\phi}_{72}^{(1)}\right)}{\partial\zeta}\right)\right);$$

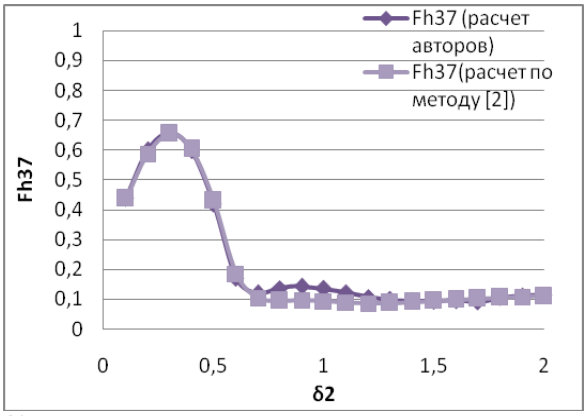
$$p_{47}^{(2)}=-\rho\left(-j(\omega_1-\omega_2)\phi_{47}^{(2)}+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial\left(\phi_{41}^{(1)}\right)}{\partial\eta}\frac{\partial\left(\bar{\phi}_{02}^{(1)}+\bar{\phi}_{72}^{(1)}\right)}{\partial\eta}+\right.\right.$$
$$+\frac{\partial\left(\phi_{01}^{(1)}+\phi_{71}^{(1)}\right)}{\partial\zeta}\frac{\partial\left(\bar{\phi}_{42}^{(1)}\right)}{\partial\zeta}+\frac{\partial\left(\phi_{41}^{(1)}\right)}{\partial\zeta}\frac{\partial\left(\bar{\phi}_{02}^{(1)}+\bar{\phi}_{72}^{(1)}\right)}{\partial\zeta}$$
$$\left.+\frac{\partial\left(\phi_{01}^{(1)}+\phi_{71}^{(1)}\right)}{\partial\eta}\frac{\partial\left(\bar{\phi}_{42}^{(1)}\right)}{\partial\eta}\right)- \quad (15)$$
$$-\frac{1}{2}\left(\omega_1\left(\eta\frac{\left(\phi_{01}^{(1)}+\phi_{71}^{(1)}\right)}{\partial\zeta}-\zeta\frac{\left(\phi_{01}^{(1)}+\phi_{71}^{(1)}\right)}{\partial\eta}\right)+\right.$$
$$\left.\left.+\omega_2\left(\eta\frac{\partial\left(\bar{\phi}_{02}^{(1)}+\bar{\phi}_{72}^{(1)}\right)}{\partial\zeta}-\zeta\frac{\partial\left(\bar{\phi}_{02}^{(1)}+\bar{\phi}_{72}^{(1)}\right)}{\partial\eta}\right)\right)\right)-$$
$$-\rho\frac{1}{2}\left(\omega_1\left(\phi_{01}^{(1)}+\phi_{71}^{(1)}\right)+\omega_2\left(\bar{\phi}_{02}^{(1)}+\bar{\phi}_{72}^{(1)}\right)\right)$$

Нелинейные горизонтальные , вертикальные силы и моменты, возникающие для каждого отдельного вида колебаний, определяются посред-

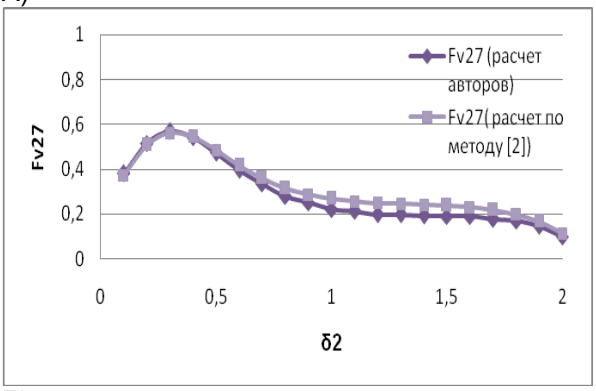
ством интегрирования соответствующего давления по контуру шпангоута [1].

2. Анализ результатов расчета

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

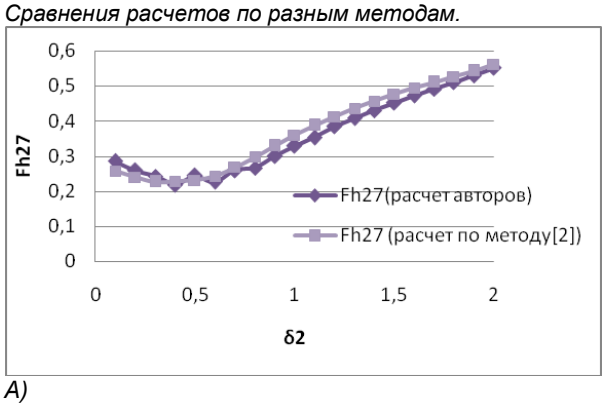


А)

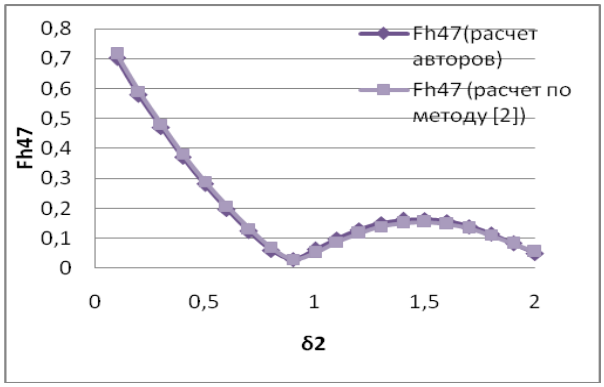


Б)

Рис.1 Значения нелинейных горизонтальных (А)и вертикальных (Б) сил для прямоугольного контура . Сравнения расчетов по разным методам.

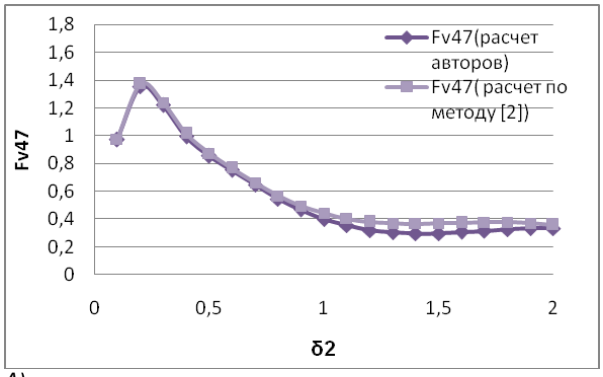


А)

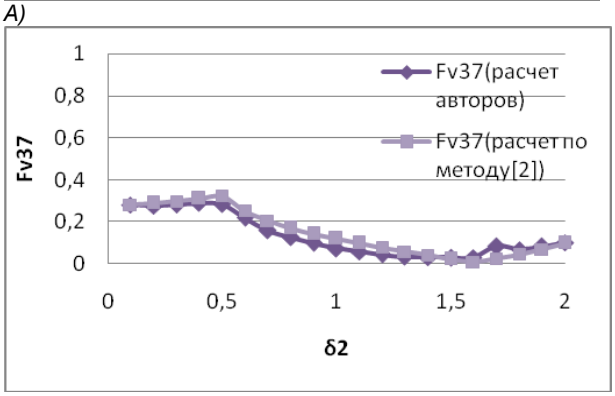


Б)

Рис.2 Значения нелинейных горизонтальных сил для эллиптического шпангоутного контура (T/b=0.6,β=0.7). Сравнения расчетов по разным методам.



А)



Б)

Рис.3 Значения нелинейных вертикальных сил для шпангоутного контура (T/b=2.5,β=0.9). Сравнения расчетов по разным методам

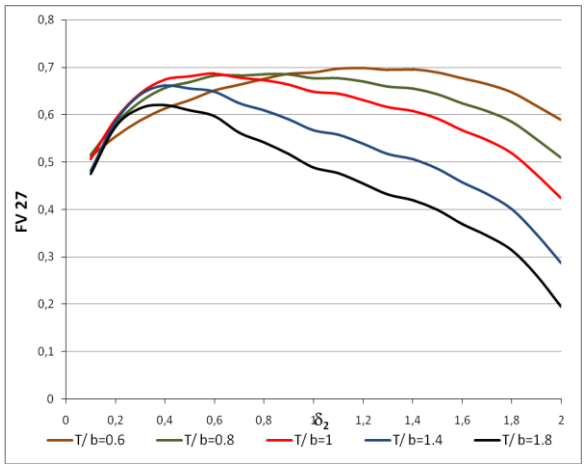
Проведенное сравнение расчетов по изложенному методу с расчетами по методу [2] для разных контуров показало практически полное совпадение результатов (рис.1-3).

В целях исследования влияния отношения осадки к полуширине на значения нелинейных сил и моментов были произведены расчеты для двух групп контуров [1]. В первой группе бульбообразных контуров при постоянном коэффициенте полноты β=0.7 значения отношения T/b принимались равными 0.6,0.8,1,1.4,1.8 . В группе U-образных контуров коэффициент полноты β=0.9.

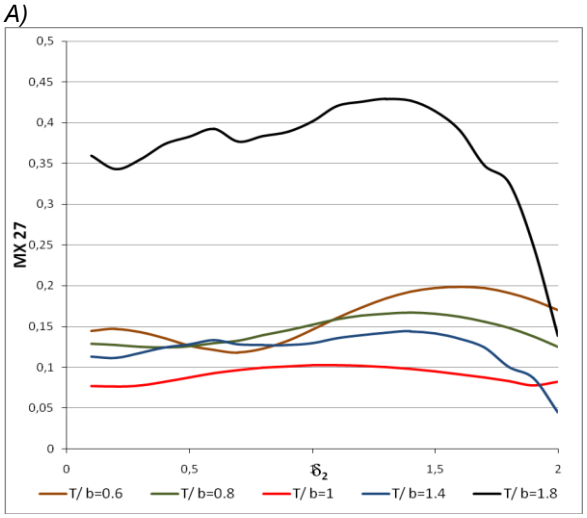
Расчеты проводились при δ_1=2.01 и изменении δ_2 от 0.1 до 2. Здесь

$$\delta_1 = K_1 b; \qquad \delta_2 = K_2 b.$$

Характерные результаты расчетов нелинейных сил и моментов при изменении отношения осадки к полуширине приведены на рис.4-6

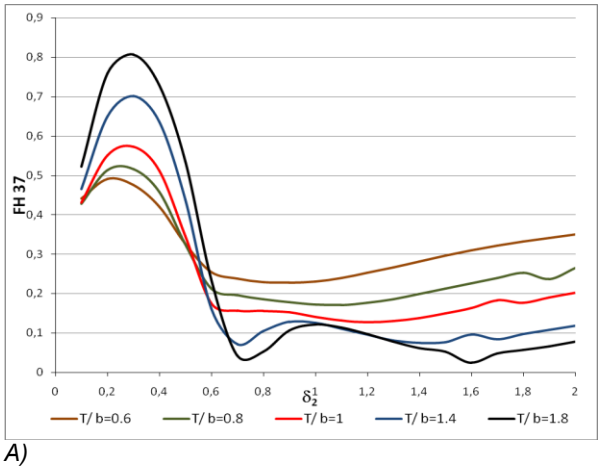


А)

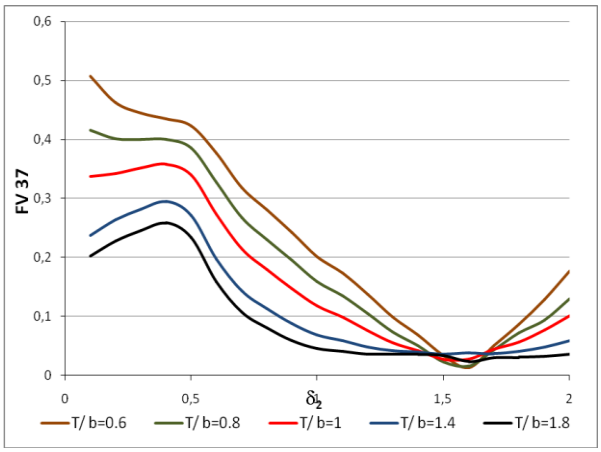


Б)

Рис.4 Значения нелинейных вертикальных сил и моментов, возникающих при ПГК бульбообразных контуров в зависимости от изменения отношения осадки к полуширине.

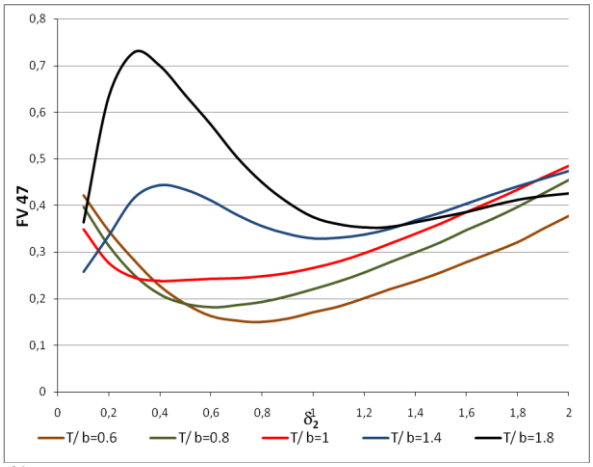


А)

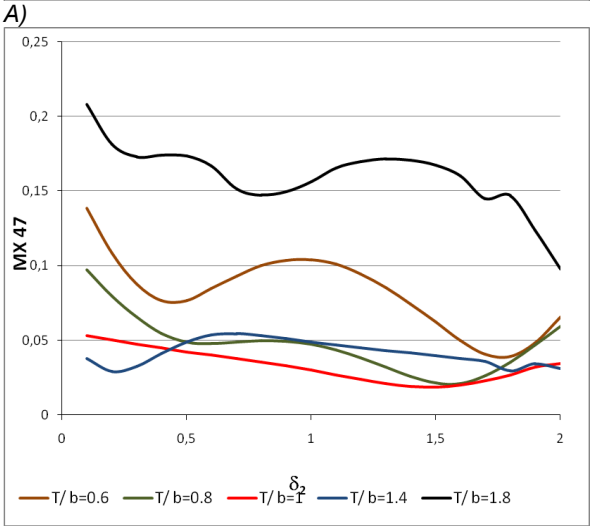


Б)

Рис.5 Значения нелинейных горизонтальных и вертикальных сил, возникающих при ВК U-образных контуров в зависимости от изменения отношения осадки к полуширине.



А)



Б)

Рис.6 Значения нелинейных вертикальных сил и моментов , возникающих при БК бульбообразных контуров в зависимости от изменения отношения осадки к полуширине.

Проведенный анализ полученных результатов показал, что при поперечно-горизонтальных колебаниях контура на волнении нелинейные вертикальные силы возрастают при уменьшении

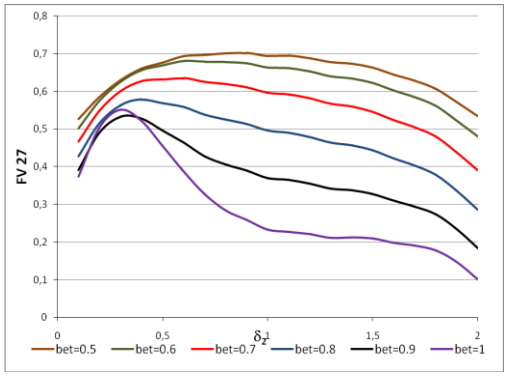
отношения T/b (рис.4а). Нелинейные горизонтальные силы, наоборот, возрастают при увеличении T/b

Нелинейные моменты *Mx27* убывают при изменении T/b от 0,6 до 1. При дальнейшем возрастании отношения моменты также возрастают (рис.4 б)

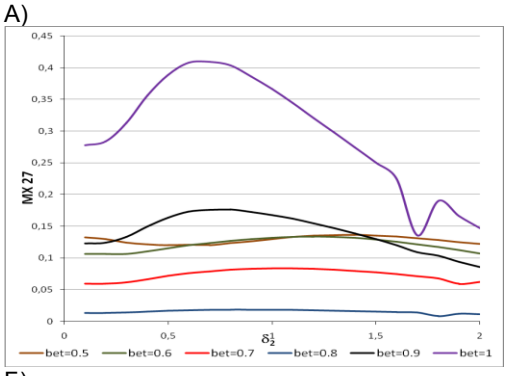
В случае вертикальных колебаний на волнении происходит увеличение вертикальных нелинейных сил при уменьшении отношения T/b (рис.5б). Нелинейные горизонтальные силы *Fh37* возрастают при увеличении T/b в зоне волновых чисел $\delta_2 < 0{,}6$. В зоне $\delta_2 > 0{,}6$ горизонтальные силы возрастают , наоборот, при уменьшении отношения T/b (рис.5а). Моменты второго порядка *Mx37* ведут себя аналогично моментам *Mx27*.

В случае бортовых колебаний на волнении нелинейные горизонтальные и вертикальные силы возрастают при увеличении отношения T/b (рис.6 а). Нелинейные моменты Mx47 убывают при изменении T/b от 0,6 до 1. При дальнейшем возрастании данного отношения моменты также возрастают (рис.6 б)

В целях исследования влияния коэффициента полноты на значения нелинейных сил и моментов были произведены расчеты для группы контуров, в которой при одинаковом отношении T/b=1 коэффициент полноты площади шпангоутного контура β принимает значения: 0.5,0.6,0.7,0.8,0.9 и 1.

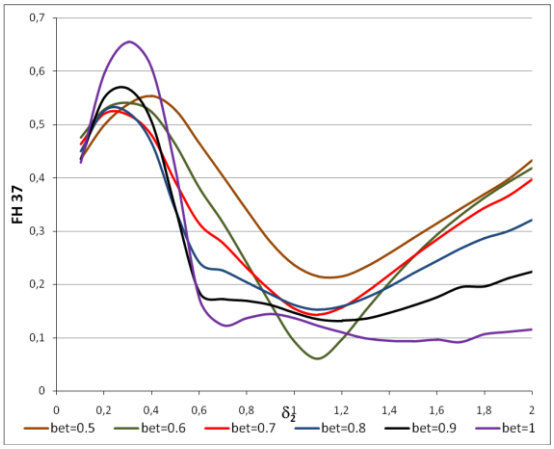


А)

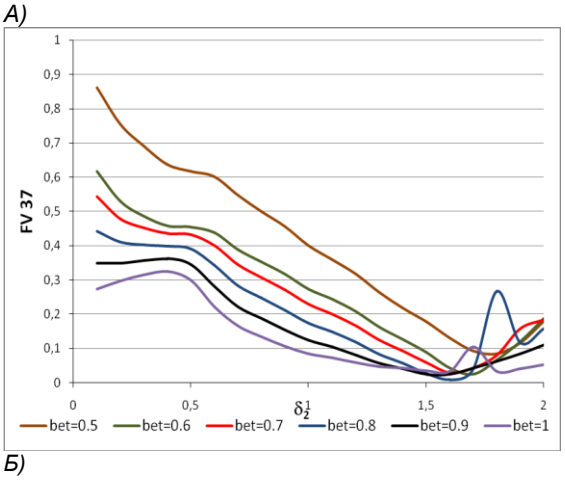


Б)

Рис.7 Значения нелинейных вертикальных сил и моментов, возникающих при ПГК контуров на волнении в зависимости от изменения коэффициента полноты.

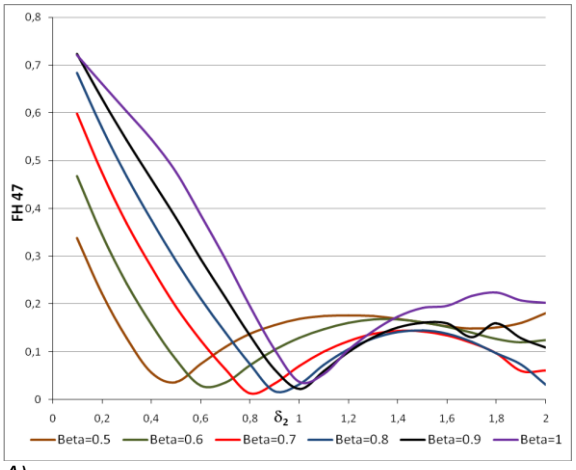


А)

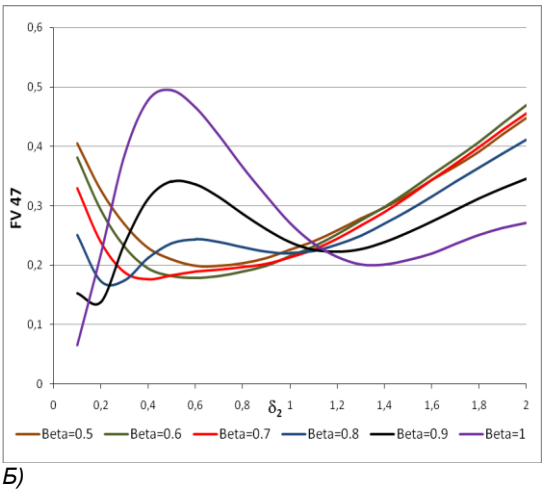


Б)

Рис.8 Значения нелинейных горизонтальных и вертикальных сил, возникающих при ВК контуров на волнении в зависимости от изменения коэффициента полноты.



А)



Б)

Рис.9 Значения нелинейных горизонтальных и вертикальных сил, возникающих при БК контуров на волнении в зависимости от изменения коэффициента полноты.

Анализ полученных результатов показал, что при ПГК на волнении нелинейные вертикальные силы возрастают при уменьшении коэффициента полноты (рис.7а). При увеличении коэффициента полноты нелинейные горизонтальные силы *Fh27* уменьшаются при $\delta_1 - \delta_2 > 0.7$ и возрастают когда $\delta_1 - \delta_2 < 0.7$. Нелинейные моменты *Mx 27* уменьшаются при увеличении β от 0,5 до 0,8, затем при увеличении β от 0,8 до 1 – возрастают (рис.7б).

В случае вертикальных колебаний контура на волнении нелинейные вертикальные и горизонтальные силы возрастают при уменьшении коэффициента полноты (рис.8 а,б).

Нелинейные моменты *Mx37* ведут себя также как и в случае поперечно-горизонтальных колебаний .

При бортовых колебаниях на волнении нелинейные горизонтальные силы возрастают на большем диапазоне частот при увеличении коэффициента полноты (рис.9а) . При увеличении коэффициента полноты нелинейные вертикальные силы увели-чиваются при $\delta_1 - \delta_2 > 0.8$ и уменьшаются при $\delta_1 - \delta_2 < 0.8$ (рис.9 б). . Нелинейные моменты *Mx 47* уменьшаются при увеличении β от 0,5 до 0,8, затем при увеличении β от 0,8 до 1 – возрастают

Выводы

Разработанный метод расчета нелинейных сил позволяет точно учесть граничное условие на свободной поверхности жидкости и в меньшей степени подвержен влиянию нерегулярных частот по сравнению с классическим методом интегральных уравнений.

Проведенное исследование влияния геометрических параметров контуров позволило сделать следующие выводы :

1. нелинейные горизонтальные силы возрастают при увеличении отношения T/b и коэффициента полноты β в случае поперечно-горизонтальных и бортовых колебаний контура на волнении. В случае вертикальных колебаний горизонтальные силы возрастают при уменьшении T/b и β.
2. нелинейные вертикальные силы возрастают при уменьшении отношения T/b и коэффициента полноты в случае поперечно-горизонтальных и вертикальных колебаний. В случае бортовых колебаний вертикальные силы возрастают при увеличении T/b . При увеличении коэффициента полноты нелинейные вертикальные силы возрастают или убывают в зависимости от диапазона волновых чисел.
3. нелинейные моменты, обусловленные разностью частот, в случае всех трех видов колебаний уменьшаются при изменении отношения T/b от 0.6 до1 и коэффициента полноты β от 0.5 до 0.8 и возрастают при дальнейшем увеличении T/b от 1 до 1.8 и β от 0.8 до 1.

Таким образом, при построении алгоритмов расчета нелинейной качки на нерегулярном волнении требуется учет всех составляющих нелинейных сил и моментов.

Литература:

1. Семенова В.Ю., Киав Тхура (2015) Определение нелинейных сил второго порядка, обусловленных разностью частот при дифракции волнения от неподвижного контура. Морские интеллектуальные технологии , N4(30), т.1 стр.16-22
2. Семенова В.Ю. “ Разработка метода расчета нелинейной качки судов”. Дисс. на соискание уч. степени д.т.н. СПбГМТУ 2005г.
3. Papanikolaou A.(1988) On the solution of the quasi-third order problem of two-dimensional cylinders in Forced –Motion . Journal of the Kansai society of Naval Architecture of Japan N 210, pp.121-133.
4. Wehausen J.V., Laitone E.V.(1960) Surface waves. Encyclopedia of Physics. Berlin, Springer-Verlag, v.9, p.446-778

References

1. Semenova V.Yu., Kiav Tkhura (2015) Opredelenie nelineynykh sil vtorogo poryadka, obuslovlennykh raznost'yu chastot pri difraktsii volneniya ot ne-podvizhnogo kontura. Morskie intellektual'nye tekhnologii , N4(30), t.1 str.16-22
2. Semenova V.Yu. “ Razrabotka metoda rascheta nelineynoy kachki sudov”. Diss. na soiskanie uch. stepeni d.t.n. SPbGMTU 2005g.
3. Papanikolaou A.(1988) On the solution of the quasi-third order problem of two-dimensional cylinders in Forced –Motion. Journal of the Kansai society of Naval Architecture of Japan N 210, pp.121-133.
4. Wehausen J.V., Laitone E.V.(1960) Surface waves. Encyclopedia of Physics. Berlin, Springer-Verlag, v.9, p.446-778

Физические поля корабля, океана, атмосферы и их взаимодействие

УДК 534.26

РАССЕЯНИЕ ЗВУКА СУПЕРКАВЕРНОЙ

Клещёв Александр Александрович
доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
тел. (812) 757-10-55 e-mail: alexalex-2@yandex.ru

Огурцов Юрий Петрович
кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры морских информационных систем и технологий
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
тел. (812) 441-24-35

Аннотация

В статье рассмотрено рассеянное звуковое поле, создаваемое осесимметричной суперкаверной. Получено аналитическое решение для модели суперкаверны в виде вытянутого мягкого сфероида и выполнены количественные оценки параметров обратного рассеяния. При гидролокации объект, движущийся в суперкаверне, маскируется ею. . Поэтому рассеивающие свойства объекта с полостью (суперкаверной) определяются в основном параметрами самой суперкаверны.. Полный вид суперкавитационного течения представляет собой комбинированную структуру из головной части – суперкаверны и хвостовой части – газожидкостного следа. Отражающие свойства суперкаверны оценивались с помощью эквивалентного радиуса, полученного из угловой характеристики рассеяния, для двух сфероидальных форм каверны и для угла облучения, соответствующего максимуму отражения звука суперкаверной. Расчёт был выполнен для широкого диапазона волновых размеров *C* (от 1,0 до 100,0). Обратное отражение при косых углах облучения суперкаверны пренебрежимо мало по сравнению с углом максимального отражения.

Ключевые слова: рассеиватель звука, суперкаверна, сфероидальное тело, сечение рассеяния, эквивалентный радиус, сфероидальные координаты.

SOUND SCATTERING SUPERCAVITY

Kleshchev Alexander Alexandrovich
The professor, Dr.Sci.Phus.-Math, the professor of DEPHARTMENT OF PHYSICS STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG
Lotsmanskaya, 3. St. Petersburg 190008, Russian Federation
tel. +7(812)757-10-55, e-mail: alexalex-2@yandex.ru

OGURTCOV IURII
Candidate of technical sciences, reader, the professor of the chair STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG
Lotsmanskaya, 3. St. Petersburg 190008, Russian Federation
tel. +7(812)441-24-35

Abstract

We study in the article the scattered sound field generated by axisymmetric supercavity. Analytical solution obtained for the model supercavity a soft proiate spheroid and performed a quantitative estimation of the parameters of the backscatter. When a moving object in sonar supercavity masked by it. Therefore scattering properties of the object with the space (the supercavity) determined by the parameters of a most supercavity.. Full view of the super cavitation flow is a combined structure of the front section – supercavity and the tail section – the gas-liquid trace. Reflective properties supercavity assessed by using equivalent radius, obtained from the angular scattering characteristics, for two spheroidal forms of a cavity and for the irradiation angle corresponding to the maximum reflection of the sound supercavity. The calculation was performed for a wide range of wave sizes *C* (1,0 to 100,0). The

retroreflection oblique the angles of the radiation is negligible compared the maximum angle of a reflection.

Keywords: scatterer the sound, supercavities, spheroidal body, section the scattering, equivalent radius, spheroidal coordinates.

Введение

Высокоскоростное подводное движение в настоящее время представляет актуальную задачу науки и техники [1]. Принципиально новым решением является использование режима кавитационного обтекания, при котором резко снижается сопротивление трения вследствие образования вокруг движущегося тела газовой полости – кавитационной каверны.

Если каверна замыкается за телом, то вводится терминология – суперкавитация и суперкаверна. В режиме суперкавитации движущееся тело полностью окружено каверной. Создание устойчивой суперкаверны достигается применением кавитатора в виде плоского или конического носового элемента, а длина обеспечивается высокой скоростью движения. Такая каверна получила название естественной или паровой (вследствие ее заполнения парами воды). Для получения протяжных каверн при меньших скоростях движения применяется поддув газа в каверну. Такие каверны называются искусственными или вентилируемыми.

При гидролокации движущегося в суперкаверне объекта, суперкаверна, как отражатель, замещает корпус аппарата. Поэтому его гидролокационная заметность (видимость) определяется только рассеивающими свойствами каверны. Полный вид суперкавитационного течения представляет собой комбинированную структуру из головной части – суперкаверны и хвостовой части – газожидкостного следа, соединяющихся некоторой переходной кормовой зоной. Эти части имеют совершенно разную структуру, геометрические и временные характеристики, определяющие их рассеивающие акустические свойства. Вследствие этого их изучение необходимо провести раздельно. В данной статье рассматриваются только акустические характеристики суперкаверны.

1. Модель суперкаверны как рассеивателя звука

Как акустический рассеиватель суперкаверна представляется динамически образованной полостью в жидкости, то есть безоболочным объемным телом. Суперкаверна – это очень сложное физическое явление, параметры которого пока не получили достаточно точного аналитического математического описания, так как специфично зависят от многих условий. Наиболее изученный вариант – это стационарные осесимметричные каверны, то есть образующиеся при стационарном движении (постоянные: скорость, глубина, поддув и др.) за осесимметричным кавитатором. Этот вид суперкаверны принимается далее при рассмотрении.

Отражательная способность суперкаверны как акустического рассеивателя (отражателя) формируется ее размерами, формой, внутренним наполнением и структурой границ.

Форма и размер суперкаверны представляют главные элементы теоретического анализа кавитационных каверн. Этому вопросу посвящено большое число работ. Общепринятые в настоящее время краткие сведения, необходимые для рассматриваемой темы, сводятся к следующему [1]: решение задачи о продольном обтекании тела вращения может быть представлено в виде уравнения, выражающего «принцип независимости расширения» поперечных сечений каверны, впервые сформулированные Г. В. Логвиновичем [2].

Контур каверны определяется интегрированием уравнения и для условий горизонтального движения кавитатора с постоянной скоростью принимает вид эллипсоида вращения [1].

Уравнение формы стационарной осесимметричной каверны сводится к виду

$$R^2 = 2h\sqrt{C_н}R_н x - h^2\sigma x^2,$$

где:

R – радиус каверны,

x – расстояние от вершины,

$\sigma = \frac{p_\infty - p_к}{q}$ - число кавитации,

$q = \frac{\rho v^2}{2}$ - скоростной напор,

$R_н$ - радиус кавитатора,

$C_н$ - коэффициент сопротивления,

h - постоянная, зависящая от удлинения каверны.

Из этого уравнения следует, что размеры суперкаверны - радиус максимального сечения $R_к$ и полудлина $L_к$ равны:

$$R_к = R_н\sqrt{C_н/\sigma}; \quad L_к = R_н\sqrt{C_н}/(h\sigma)$$

откуда отношение полуосей эллипсоидальной каверны

$$\frac{R_к}{L_к} = h\sqrt{\sigma}$$

Схематичный вид такой модели показан на рис. 1.

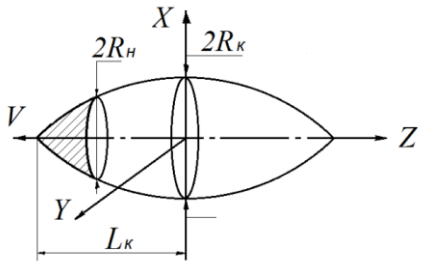


Рис. 1. Модель осесимметричной каверны.

Формулы для формы суперкаверны, предложенные разными авторами, в целом согласуются при $h = 0{,}5$.

Отличие реальной суперкаверны от строгой математической формы эллипсоида вращения заключается в носовой и кормовой частях. В носу расположен кавитатор (диск или конус), кормовая часть – область замыкания каверны вообще не имеет определенной устойчивой формы. Граница каверны в общем случае на является ровной и гладкой. По мере удаления от кавитатора на границе возрастают турбулентные возмущения, поверхность становится пенистой, матовой и непрозрачной. В вентилируемых кавернах, представляющих основной вид реальных суперкаверн, граница каверны подвергается дополнительно воздействию из каверны газовых струй поддува. В целом, структура границ каверны не получила пока какого-либо определенного описания.

Внутреннее наполнение суперкаверн – парогазовая смесь – независимо от ее конкретных параметров по акустическим характеристикам представляет собой мягкую среду по сравнению с водой.

2. Отражающая способность суперкаверны

За расчетную аналитическую модель суперкаверны как отражателя звука примем идеализированное замкнутое тело в виде мягкого гладкого вытянутого сфероида-эллипсоида вращения. Отражающую способность рассмотрим в постановке работы Клещева А. А. [5].

В технической гидроакустике, в простейшей постановке, рассматривается дальнее поле гармонической волны облучения. В этом случае звуковое давление (P_S) рассеянной волны в точке (r, θ, φ) пространства можно представить в форме:

$$P_S(r,\theta,\varphi) = \frac{A}{r} D(\theta;\ \varphi) exp[-i(\omega t - K_r)],$$

где: (r, θ, φ) – сферические координаты точки наблюдения; $D(\theta;\ \varphi)$ – угловая характеристика рассеивателя; $K = 2\pi/\lambda$ – волновое число в жидкости; $\lambda = c/f$ - длина звуковой волны; c- скорость звука в жидкости; $\omega = 2\pi f$ - круговая частота; A - амплитуда давления волны облучения в месте нахождения рассеивателя.

Характеристика $D(\theta;\ \varphi)$ отражающего объекта определяется волновым размером тела, его формой, материалом, ориентацией относительно наблюдателя и является, таким образом многофакторной характеристикой отражательной способности.

Поскольку для идеально отражающей сферы радиуса (R) больших волновых размеров с хорошим приближением для всех углов (кроме теневого) можно принять

$$|D(\theta;\ \varphi)| = R/2,$$

то в технической гидроакустике для произвольного отражателя на этом основании вводится понятие эквивалентного радиуса

$$R_{экв} = 2|D(\theta;\ \varphi)|.$$

Угловые характеристики сфероидов получены в [5] решением в вытянутых сфероидальных координатах (ξ, η, φ), связанными с прямоугольными координатами ($x, y\ z$) преобразованием

$$x = h_0(1-\eta^2)^{\frac{1}{2}}(\xi^2-1)^{\frac{1}{2}} cos\varphi$$
$$y = h_0(1-\eta^2)^{\frac{1}{2}}(\xi^2-1)^{\frac{1}{2}} sin\varphi$$
$$z = h_0 \cdot \xi \cdot \eta,$$

где $2h_0$ - межфокусное расстояние эллипсоида.

Для вытянутого сфероида выражение имеет вид

$$D(\eta,\varphi) = -(2/ik)\sum_{m=0}^{\infty}\sum_{n\geq m}^{\infty}(-1)^n \varepsilon_m i^{-n} *$$
$$* \bar{S}_{m,n}(C,\eta_0)\ \cos m\varphi \cdot \bar{S}_{m,n}(C,\eta)\Omega *$$
$$* R^{(1)}_{m,n}(C,\xi_0)/\Omega R^{(3)}_{m,n}(C,\xi_0))$$

где: $k = 2\pi/\lambda$ - волновое число, $C = kh_0$ - волновой размер в сфероидальных координатах, $2h_0$ - межфокусное расстояние, $\eta_0 = \cos\theta_0$, ξ_0 - радиальная координата поверхности сфероидального рассеивателя, $\varepsilon_m = 1$ при $m = 0$; , $\varepsilon_m = 2$ при $m \neq 0$, $\Omega = 1$ для абсолютно мягкого сфероида, $\bar{S}_{m,n}(C,\eta)$ - нормированная угловая сфероидальная функция, $* R^{(1)}_{m,n}(C,\xi_0)$ - радиальная сфероидальная функция первого рода, $R^{(3)}_{m,n}(C,\xi_0)$ - асимптотика радиальной сфероидальной функции третьего рода.

В расчетной модели вытянутого сфероида (рис.2) главные полуоси примерно соответствуют полудлине и радиусу каверны

$$a \approx L_k;\ b \approx R_k$$

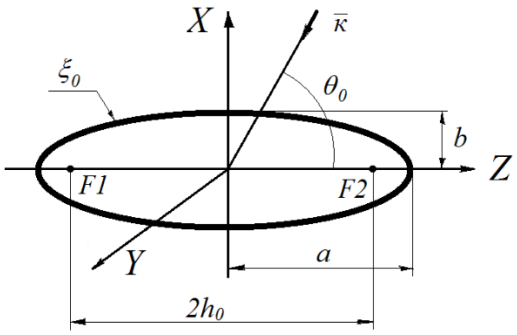


Рис. 2. Расчетная модель сфероида.

Расчетными параметрами сфероида в аналитическом решении являются межфокусное расстояние ($2h_0$), задающее размер сфероида, и параметр (ξ_0), отражающий форму сфероида соотношением осей

$$2a = 2h_0\xi_0;\ 2b = 2h_0(\xi_0^2-1)^{\frac{1}{2}};\ \xi_0^2 = \left(\frac{b}{a}\right)^2 + 1.$$

Для иллюстрации полученного решения выполнены расчеты для частных примеров вытянутого мягкого сфероида. Рассмотрим вариант только траверзной локации ($\theta_0 = 90$ град). Зависимость отражательной способности от ракурса, представляющая более сложный математически и физически интересный случай, не затрагивает-

ся ввиду отличия сильно влияющих при этом концевых форм реальной каверны и сфероида.

В таблице приведены результаты расчетов для сфероида с размером $h_0 = 1$ м и двумя формами: $\xi_0 = 1{,}005$ (что соответствует соотношению осей $\frac{a}{b} = \frac{L_k}{R_k} = 10$ и числу кавитации $\sigma = 0{,}04$ суперкаверны) и $\xi_0 = 1{,}0069$ ($\frac{a}{b} = \frac{L_k}{R_k} = 8{,}56$; $\sigma = 0{,}053$).

Таблица. Эквивалентный радиус сфероида $h_0 = 1$ м.

C	λ, м	f, кГц	K, $м^{-2}$	$R_{экв}$, м	
				$\xi_0 = 1{,}005$	$\xi_0 = 1{,}0069$
1,0	6,28	0,24	1,0	0,692	0,727
2,0	3,14	0,48	2,0	0,761	0,792
3,0	2,09	0,72	3,0	0,824	0,850
4,0	1,57	0,96	4,0	0,861	0,882
5,0	1,26	1,19	5,0	0,886	0,907
6,0	1,05	1,43	6,0	0,910	0,9324
7,0	0,90	1,67	7,0	0,932	0,960
8,0	0,79	1,90	8,0	0,954	0,986
9,0	0,70	2,14	9,0	0,977	1,010
10,0	0,63	2,38	10,0	1,000	1,032
15,0	0,42	3,57	15,0	1,070	
20,0	0,31	4,84	20,0	1,075	
30,0	0,21	7,14	30,0	1,032	
40,0	0,16	9,38	40,0	1,017	
100,0	0,06	24	100,0	0,980	

Графики зависимости эквивалентного радиуса от волнового размера (C) приведены на рис. 3.

Величина эквивалентного радиуса сфероида – отражателя просто пропорциональна его длине (h_0, a или L_k). Поэтому данные для других продольных размеров не приводятся. Влияние поперечного размера (иначе полноты или удлинения) суперкаверны – сфероида очевидно - увеличение поперечного размера (b или R_k) приводит к увеличению эквивалентного радиуса. Зависимость отражательной способности от волновых размеров (в пределах выполненного диапазона расчетов) оказалась монотонной и относительно слабой.

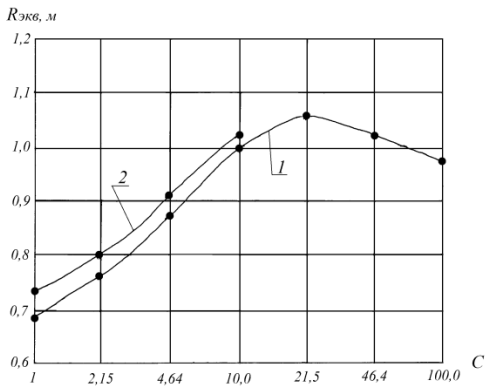


Рис. 3. Эквивалентный радиус обратного траверзного рассеяния мягкого вытянутого сфероида (1 - $\xi_0 = 1{,}005$; 2- $\xi_0 = 1{,}0069$).

При увеличении волнового размера сечения рассеяния мягкого и жесткого сфероидов сходятся. Поэтому можно для технических оценок использовать результаты более простых решений [6], полученные для жестких сфероидов больших волновых размеров. Эквивалентный радиус трехосного эллипсоида определяются формулой

$$R_э = \frac{a \cdot b \cdot c}{a^2 cos^2\alpha + b^2 cos^2\beta + c^2 cos^2\gamma},$$

где: a, b, c - полуоси эллипсоида, α, β, γ - углы направления волны облучения к осям $x, y\ z$ соответственно.

При $b = c$ образуется эллипсоид вращения. В частности, если $\beta = 0$, $\alpha = \gamma = 90$ град, то есть локация с направления, перпендикулярного оси вращения (a), то $R_э = a$.

Модуль угловой характеристики рассеяния $D(\theta;\ \varphi)$ вытянутого мягкого сфероида ($\xi_0 = 1{,}005; C = 15$) при угле облучения $\theta_0 = 90$ град показан на рис. 4.

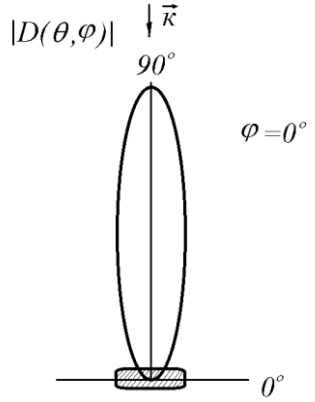


Рис. 4. Угловая характеристика вытянутого мягкого сфероида при угле облучения $\theta_0 = 90°$, $\varphi_0 = 0°$, $C = 15$, $\xi_0 = 1{,}005$.

Заключение

Оценка рассеивающих свойств суперкаверны в виде идеализированной модели эллипсоида вращения выполнена использованием решения для мягкого гладкого вытянутого сфероида. Примеры количественных расчетов выполнены для условия траверзного лоцирования. При этом наименьшее влияние оказывает несоответствие формы реальной суперкаверны и математического эллипсоида вращения. Отражательная способность суперкаверны (величина эквивалентного радиуса) с этого направления является наибольшей. Количественные расчеты по полным аналитическим решениям требуют значительных вычислительных усилий.

Литература

1. Грумондз В. Т., Журавлев Ю. Ф., Парышев Э.В., Соколянский В.П., Шорыгин О.П. Гидродинамика и динамика высокоскоростного движения тел в жидкости. М.: Наука, 2013. 574 с.
2. Логвинович Г. В. Гидродинамика течений со свободными границами. Киев: Наукова думка, 1969.
3. Клещёв А. А., Шейба Л.С. Рассеяние звуковой волны идеальными вытянутыми сфероидами. // Акустический журнал, Т. 16. № 2. 1974. С. 264 – 268.
4. Клещёв А. А., Клюкин И. И. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1987. 224 с.
5. Клещёв А. А. Гидроакустические рассеиватели. 2-ое издание, С-Пб.: Прима, 2012, 268 с.
6. Гутин Л. Я. Избранные труды. Л.: Судостроение, 1977.

References

1. Grumondz V.T., Juravlev I.F., Paryshev E.V., Socolynski V.P., Shorygin O.P. Hydrodynamics and dynamics of high-speed movement body in fluid. Russia, Moscow, Nauka, 8013,574 p.
2. Logvinovich G.V. Hydrodynamics of Free-Boundary Flows, Naukova Dumka, Kiev, 1969.
3. Kleshchev A.A., Sheiba L.S. Scattering of sound wave by ideal prolate spheroigs. Sov. Phys. Acoust.v.16,n2,P.264-268.
4. Kleshchev A.A., Klukin I.I. Principles of Underwater sound. St. Petersburg, Sudostroenie, 1987, 224P.
5. Kleshchev A.A. Hydroacoustic Scatterers. St. Petersburg: Prima, 2012, 268 p.
6. Gutin L.J. Selected works. Leningrad.: Sudostroenie, 1977.

УДК 537.84

РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ В ПРЯМОЛИНЕЙНОМ КАНАЛЕ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

Маламанов Степан Юрьевич
Кандидат физико-математических наук, докторант
Санкт-Петербургский государственный университет
198504, Санкт-Петербург, Петергоф, Университетский просп., 35
e-mail: stevmal@mail.ru

Павловский Валерий Алексеевич
Доктор физико-математических наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

Аннотация

В последнее время очень часто численные методы исследования используются как альтернатива дорогих и трудоемких экспериментальных. Современный вычислительный комплекс ANSYS позволяет проводить анализ научно – технических задач в самых разных областях практической деятельности. Накоплен богатый опыт его использования по расчету параметров магнитных систем, электрических аппаратов, радиоэлектронных схем, моделированию низко – и высокочастотных проявлений электромагнетизма. Однако расчет магнитогидродинамический течений стал возможным сравнительно недавно с появлением специального модуля MHD. В работе рассматривается применение гидродинамического модуля ANSYS.CFX к расчету течения ртути в прямолинейном канале. Интерес к подобной задачи вызван в первую очередь запросами атомной энергетики и энергомашиностроения, где вопросам интенсификации теплообмена и повышению энергетической эффективности теплообменных аппаратов уделяется громадное значение. Прикладывается постоянное магнитное поле, перпендикулярное скорости движения. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: численное моделирование, проводящая жидкость, скорость потока, турбулентность, магнитное поле, число Гартмана, число Рейнольдса.

CALCULATION CONDUCTIVE LIQUID FLOW IN A STRAIGHT SQUARE SECTION CHANNEL

Malamanov Stepan Yur'evich
Kandidat fiziko-matematicheskix nauk, doktorant
Sankt-Peterburgskij gosudarstvenny'j universitet
198504, Sankt-Peterburg, Petergof, Universitetskij prosp., 35
e-mail: stevmal@mail.ru

Pavlovsky Valery Alekseevich
Doktor fiziko-matematicheskix nauk, professor
Sankt-Peterburgskij gosudarstvenny'j morskoj texnicheskij universitet
190008, Sankt-Peterburg, ul. Locmanskaya, 3
e-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com

Abstract

Recently, very often numerical methods are used as an alternative to expensive and time-consuming experimental. Modern computer system ANSYS allows the analysis of the scientific - technical problems in a variety of practice areas. Accumulated a wealth of experience of its use for the calculation of the parameters of magnetic systems, electrical apparatus, radio-electronic circuits, simulation of low - and high manifestations of electromagnetism. However, the calculation of MHD flows became possible only recently with the advent of a special module MHD. The paper deals with the use of hydrodynamic module ANSYS.CFX to the calculation of the flow of mercury in straight channel. Interest in this problem due primarily to inquiries of nuclear energy and power engineering, where the issues of enhancement of heat transfer and energy efficiency of heat exchangers is given

great importance. Applies a constant magnetic field perpendicular to the velocity. The calculation results are compared with experimental data.

Key words: numerical simulation, the conductive fluid flow rate, turbulence, the magnetic field, the Hartmann number, the Reynolds number.

Введение

Математическое моделирование на базе междисциплинарного подхода в ANSYS позволяет инженерам разрабатывать и внедрять новые решения достаточно быстро. Это происходит потому, что интегрированные возможности позволяют моделировать взаимодействие различных физических полей, выполнять глубокую проработку конструкций, узлов машин и сложных систем. Кроме того, встроенные модули содержат средства, позволяющие проводить оперативные изменения в геометрии устройства, а также дающие возможность исследования большого числа разнообразных условий в рамках многопараметрических задач. Данный вычислительный продукт позволяет адекватно воспроизводить внешнюю и внутреннюю аэродинамику, гидро-газодинамику, напряженно-деформированное и тепловое состояние, течение многофазных сред, горение и многое другое. Это как раз те процессы, с которыми сталкиваются в судостроении, где постановка задач с помощью компьютерного моделирования снижает затраты на разработку, экономит время, повышает надежность и безопасность отдельных узлов и изделий в целом, улучшает технологический процесс. Все вышеизложенное позволяет говорить, что на помощь научному работнику и инженеру пришел вычислительный эксперимент, который в механике жидкости и газа реализуется с помощью вычислительной гидродинамики. Основным элементом в ней является математическая модель – система уравнений вместе с начальными и граничными условиями, описывающими интересующий процесс. При этом главным аспектом является приближение математической (виртуальной) модели к описанию процессов, реально наблюдаемым эксперименте. В этой связи, необходимо не только воспроизведение интересующих параметров, но и правильное описание отдельных процессов, побочных явлений и их общее взаимодействие.

В данной работе на примере расчета течения проводящей жидкости (ртути) в канале квадратного сечения проводится расчет характеристик турбулентного потока (скорости) с помощью трех моделей турбулентности, реализуемых в ANSYS.CFX. Первой является хорошо известная «k - ε» модель (эта модель содержит уравнение переноса кинетической энергии турбулентности k и уравнение переноса скорости ее диссипации – ε), второй – «k - ω» (где ω – удельная скорость диссипации), а третья - это модель переноса компонентов тензора напряжений Рейнольдса («SSG» – модель) [1 - 3]. Выбор моделей не случаен. Первая из них имеет хорошую, многолетнюю апробацию в инженерной и научно-исследовательской работе и лучше описывает свойства сдвиговых течений. Вторая, за счет усовершенствований внесенных Ментером [4], имеет преимущества при моделировании пристеночных функций. Третья модель более современная и претендует на роль более информативной, т.к. в ней турбулентные напряжения находятся из решения соответствующих уровней переноса, что позволяет учитывать большинство эффектов, свойственных турбулентному течению, в частности, анизотропию. С другой стороны, использование трех указанных моделей позволит произвести сравнительный анализ того, как они воспроизводят наблюдаемые в реальном эксперименте величины. А это, в свою очередь, делает более осознанным подход к выбору модели турбулентности, необходимой для расчета сложных течений в силовых судовых агрегатах. Однако первоначально целесообразно провести серию тестовых расчетов и тем самым апробировать комплекс применительно к решению геометрически простых, но глубоко физичных задач. Задачи магнитной гидродинамики для судовой энергетики в этом смысле являются весьма привлекательными. Моделирование таких задач сводится к решению трехмерных стационарных уравнений магнитной гидродинамики, вместе с соответствующей моделью турбулентности.

Рассмотрим МГД -_течение ртути в канале квадратного сечения. Схема течения представлена на рис. 1

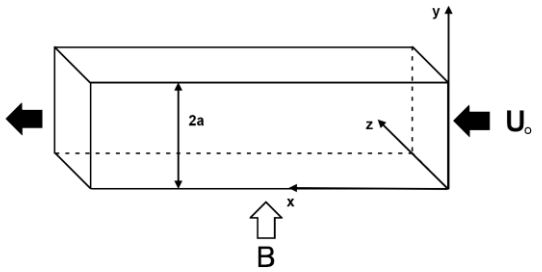


Рис. 1 Схема течения

При заданных скорости жидкости на входе в канал и магнитном поле, течение зависит как от числа Рейнольдса

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho U_0 \cdot 2a}{\mu},$$ так и от числа Гартмана

$Ha = B \cdot 2a\sqrt{\frac{\sigma}{\mu}}$. В этих выражениях ρ – плотность жидкости, μ – коэффициент динамической вязкости, $U_0 = 0.4\frac{м}{с}$ – масштаб скорости - скорость течения на входе в канал, σ- коэффициент электрической проводимости, $2a$ –ширина канала ($2a = 1,7 \cdot 10^{-2} м$.).

Результаты численного моделирования при числе $\mathrm{Re} = 6 \cdot 10^4$, соответствующему турбулентному режиму течения, и числе Ha = 440 представлены в безразмерном виде на рис. 2 и 3 на фоне экспериментальных данных [5].

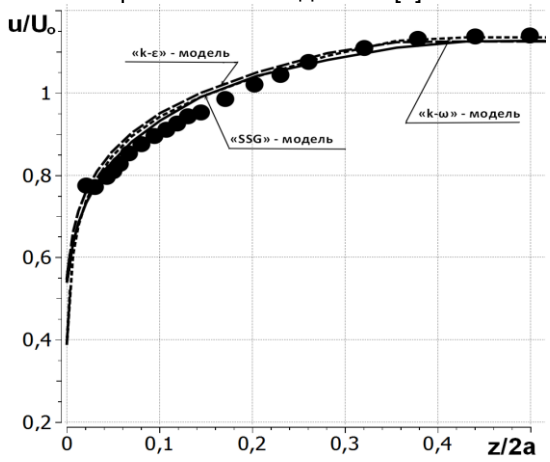


Рис. 2 Сравнение безразмерных профилей скорости при использовании различных моделей турбулентности на фоне экспериментальных данных. Линии – результаты моделирования, кружки - экспериментальные данные.

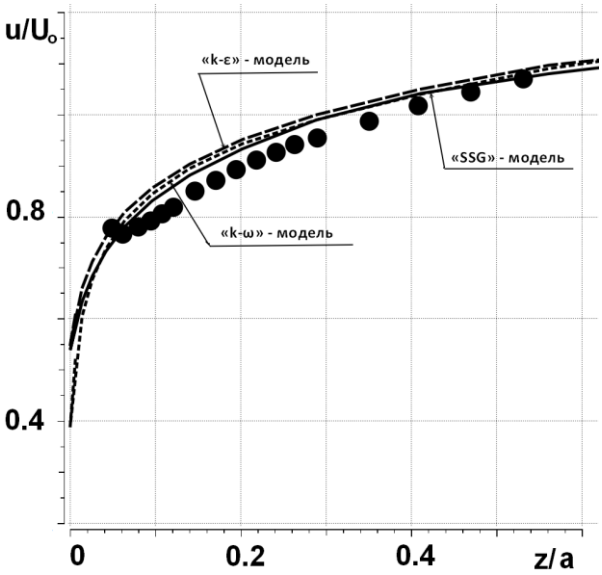


Рис. 3 . Сравнение безразмерных профилей скорости вблизи стенки, когда координата **z** отнесена к полуширине канала **a**. Линии – результаты моделирования, кружки - экспериментальные величины согласно работе [5].

Видно достаточно хорошее совпадение с экспериментальными данными. И если для более тонкой «SSG» - модели это «закономерно», то для более простых «k - ε» и «k - ω» (которые содержат только по два дифференциальных уравнения переноса характеристик турбулентности) – это очень хороший результат. При этом следует подчеркнуть, что речь идет о моделировании сложного физического процесса – турбулентного течения хорошо проводящей жидкости (σ ртути $\approx 10^6 \frac{См}{м}$, для сравнения, коэффициент электропроводности морской воды $\sigma = 5\frac{См}{м}$), находящейся в достаточно сильном магнитном поле - $B = 0,3Тл$. По всей видимости, здесь проявляется определенный консерватизм, свойственный турбулентности, который проявляется в том, что большинство моделей турбулентности разрабатывались для моделирования обычных течения газа, реже жидкости, а совсем не для потребностей магнитной гидродинамики. Также отметим, что при проведении расчетов использовались стандартные установки комплекса ANSYS.CFX, ничего дополнительного, связанного со спецификой данной задачи, здесь добавлено не было.

Заслуживает внимания еще один факт, о котором стоит упомянуть. Прослеживается, впервые отмеченная Гартманом тенденция, «поджатия» профиля скорости при наличии магнитного поля (число Ha отлично от нуля), что является следствием перехода энергии в системе «поле–среда».

Выполненный сравнительный анализ моделирования течения ртути показывает, что модели «k - ε» и «k - ω», несмотря на их простоту по сравнению с моделью «SSG», достаточно точно как качественно, так и количественно описывают поведение характеристик потока проводящей жидкости в канале. Также этот анализ позволяет более осознанно моделировать МГД-течения с помощью ANSYS.CFX .

Литература

1. Turbulence// J.Fluid Mech. 1991. Vol. 227. pp 245 – 272.
2. Юн А.А. Теория и практика моделирования турбулентных течений. – М.: Книжный дом «Либроком». 2009. - 272 с.
3. Новожилов В.В., Павловский В. А. Установившиеся турбулентные течения несжимаемой жидкости. – СПб: изд-во СПбГУ, 2013. – 483 с.
4. Menter F.R. Zonal tw Speziale C.G., Sarkar S., Gatski T.B. Modeling the Pressure – Stain Correlation of o Equation «k - ω» Turbulence Models for Aerodynamics Flows. AIAA 93-2906.
5. Takahashi M. Recent Research Activities on Liquid Metal MHD Phenomena in Japan. APEX-6/FHPD Workshop. February 16-19. 1999.

References

1. Speziale C.G., Sarkar S., Gatski T.B. Modeling the Pressure – Stain Correlation of Turbulence. J.Fluid Mech. 1991. Vol. 227. pp 245 – 272.
2. Yun A.A. Teoriya i praktika modelirovaniya turbulentnykh techeniy. – M.: Knizhnyy dom «Librokom». 2009. - 272 s.
3. Novozhilov V.V., Pavlovskiy V. A. Ustanovivshiyesya turbulentnyye techeniya neszhimayemoy zhidkosti. – SPb: izd-vo SPbGU, 2013. – 483 s.
4. Menter F.R. Zonal two Equation «k - ω» Turbulence Models for Aerodynamics Flows. AIAA 93-2906.
5. Takahashi M. Recent Research Activities on Liquid Metal MHD Phenomena in Japan. APEX-6/FHPD Workshop. February 16-19. 1999.

Вычислительная техника и управление

УДК 629.584

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ДВИЖЕНИЕМ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ТИПА ГЛАЙДЕР

Туркин Игорь Иванович
докт. техн. наук, профессор кафедры Судовой автоматики и измерений
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008 г. Санкт-Петербруг, ул. Лоцманская д.3
тел.: +7 (921) 341-63-03; e-mail: iiturkin@gmail.com
Крятов Арсений Юрьевич
аспирант кафедры Судовой автоматики и измерений
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008 г. Санкт-Петербруг, ул. Лоцманская д.3
тел.: +7 (921) 341-63-03; e-mail: iiturkin@gmail.com
Мин Хеин
Республика Союз Мьянмы
аспирант кафедры Судовой автоматики и измерений
маг. техн. наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008 г. Санкт-Петербруг, ул. Лоцманская д.3
тел.: +7 (900) 649-65-36; e-mail: hawgyi86@gmail.com

Аннотация

Приведены результаты разработки системы автоматического оптимального управления пространственным движением подводного аппарата типа глайдер с цилиндрической (торпедообразной) гидродинамической формой. Особенностью принятого подхода при разработке математической модели глайдера является применение методов классической теории универсальных подводных аппаратов. На первом этапе разработаны математические модели глайдера как объекта управления его движением отдельно в вертикальной и горизонтальной плоскостях, погружением и всплытием. Затем путём согласования этих моделей сформирована обобщённая многомерная математическая модель глайдера при его движении в пространстве. Для формирования алгоритмов оптимального управления его движением в вертикальной плоскости и пространстве применены методы аналитического конструирования оптимальных регуляторов. Выполнена проверка эффективности разработанных алгоритмов путём имитационного моделирования Полученные результаты позволяют сделать вывод о работоспособности и эффективности разработанной системы управления.

Ключевые слова: подводный аппарат, глайдер, классическая теория подводных аппаратов, математическая модель, управление.

AUTOMATIC OPTIMAL CONTROL SYSTEM OF SPATIAL MOTION OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE FOR TYPE GLIDER

Turkin Igor Ivanovich
Doctor Sci. Tech., Department «Ship automation and measurement»
State Marine Technical University of Saint-Petersburg
190008, Saint-Petersburg, Lotsmanskya Street, 3.
Tel.: +7 (921) 341-63-03; e-mail: iiturkin@gmail.com
Kyartov Arseniy Yurevich
Post-graduate
State Marine Technical University of Saint-Petersburg
190008, Saint-Petersburg, Lotsmanskya Street, 3.
e-mail: iiturkin@gmail.com
Min Hein
The Republic of Union of Myanmar
Postgraduate, Department «Ship automation and measurement»
Master Sci. Tech., State Marine Technical University of Saint-Petersburg
190008, Saint-Petersburg, Lotsmanskya Street, 3.
Tel.: +7 (900) 649-65-36; e-mail: hawgyi86@gmail.com

Abstract

The results of development of the automatic optimal control system of spatial motion of underwater glider-type device with a cylindrical (torpedo) hydrodynamic shape was bring out. A feature of the definitely approach in the development of a mathematical model of the glider presents the use of the methods of the classical theory of universal submersibles. The first stage developed mathematical models of glider as a control object of his motion separately in vertical and horizontal planes, dive and ascent. Then, the matching way of these models formed by the generalized multi-dimensional mathematical model of the glider as it moves in the space. To generate optimal control algorithms for its movement in the vertical plane and the space used methods of analytical design of optimal controllers. This test performs effectiveness of the development by simulation algorithms. The obtained results allow us to conclude about the perfection and efficiency of the developed control system.

Key words: underwater vehicle, glider, classical theory of underwater vehicles, mathematical model, control.

1. Состояние проблемы

Подводные аппараты типа глайдер (далее ПАГ) представляют собой относительно новый класс автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) с движительными системами, основанными на изменении остаточной плавучести. Они решают обширный круг задач, которые со временем пополняется, основные из них - обзорно-поисковые, обследовательские, научные исследования, исследования в интересах военно-морского флота.

Отличительными особенностями аппаратов этого класса являются:

сверхбольшая дальность хода и рекордная автономность (до года);

малые массогабаритные характеристики, обеспечивающие возможность легкого (мало затратного) и оперативного их развертывания;

низкая стоимость производства и эксплуатации ПАГ;

возможность эффективного использовать ПАГ в групповом составе;

простота процедур сбора информации и корректировки программного задания, определяемая возможностями современных телекоммуникационных технологий;

низкая тепловая заметность — практически полностью определяется температурным перепадом по глубине траекторного подводного движения ПАГ;

сверхмалая акустическая заметность;

низкая визуальная заметность при всплытиях, необходимость в которых возникает только для непродолжительных сеансов обмена данными.

Автономные необитаемые подводные аппараты классифицируются по двум признакам: по массе и по форме. По массе АНПА подразделяются на микро, мини, малые, средние и большие.

По массе АНПА подразделяются на микро, мини, малые, средние и большие. К автономным подводным микроаппаратам относятся аппараты массой менее 20кг. Данная категория составляет 20-25% от общего числа известных проектов АНПА. Большая часть АНПА создается с использованием бионических принципов и носит экспериментальный характер. Типовые технические характеристики этой категории аппаратов: дальность плавания не более 1-2 морских миль, предельная рабочая глубина менее 150 м; скорость хода - 1,5-2 узла. К категории мини-АНПА принадлежат аппараты массой в пределах 20-100 кг (15-20% от общего числа зарубежных проектов АНПА). Диапазон дальности плавания мини-АНПА весьма широк - от 0,5 до 4000 морских миль. Малые АНПА - это АНПА массой 100-500 кг. Средние АНПА обладают массой от 500 до 2000 кг.

По форме корпуса АНПА (по облику конструкции) сформировались следующие типы:

с классическими гидродинамическими формами (цилиндрической, торпедообразной, каплеобразной, плоской и комбинированной);

планерной формы с системой движения, основанной на изменении собственной (остаточной) плавучести аппарата;

с плоской верхней частью корпуса (солнечные АНПА - аппараты с фотоэлектронными преобразователями для подзарядки аккумуляторных батарей);

с бионическими формами (плавающего и ползущего типа) или созданные с использованием бионических принципов (например, аппараты с плавниковыми движителями).

Подводные аппараты типа глайдер с классическими гидродинамическими формами (цилиндрической, торпедообразной) и планерной формой движения наиболее распространены. Анализ состояния и перспектив развития ПАГ показывает, что существенным резервом повышения их эффективности, увеличения дальности плавания является совершенствование их систем управления движением. Системы управления движением различных ПАГ в настоящее время относятся к числу наиболее важных и стремительно развивающихся систем. Эти системы всё в большей мере становятся комплексными, обеспечивающими все основные этапы выполнения соответствующих задач аппаратом. Они объединяют в процессе функционирования многочисленные подсистемы, используют информацию разнообразных датчиков. Существуют различные подходы к созданию таких систем. Многие результаты представлены в литературе относительно динамики планеров, управляемых рулями. Тем не менее, меньше результатов существуют для планеров, управляемых вращающейся массой [1-3]. Однако проблема создания эффективных систем управления движением ПАГ остаётся не решённой. Задачи рационального построения этих систем управления для обеспечения надёжности и

безопасности движения, необходимой точности являются важными, актуальными и требуют привлечения новых методов.

2. Цель и задачи работы

Целью работы является разработка системы автоматического оптимального управления пространственным движением подводного аппарата типа глайдер с цилиндрической (торпедообразной) гидродинамической формой на основе классической теории подводных аппаратов.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

- разработка математической модели ПАГ как объекта управления его движением в вертикальной плоскости и в пространстве;
- разработка алгоритмов оптимальных управления пространственным движением ПАГ;
- проведение имитационного моделирования процессов движения ПАГ в вертикальной плоскости и пространстве с разработанными алгоритмами.

3. Методы исследования

Для движения ПА в общем случае (универсального ПА) различают задачи стабилизации невозмущённого, возмущённого движения и движения при отсутствии скорости хода. К невозмущённому движению относится режим плавания удифферентованного ПА на больших гдубинах, где практически отсутствует влияние взволнованной поверхности моря, придонных течений. В целом, в этом режиме плавания влияние внешних возмущающих воздействий несоизмеримо с эффективностью регулирующих органов, в качестве которых используются горизонтальные и вертикальные рули. В данном режиме плавания осуществляется автоматическая стабилизация угловых пространственных координат движения ПА: крена, дифферента, курса и глубины погружения. Возмущённое движение ПА характерно при его плавании вблизи поверхности моря. При этом на движение ПА оказывают влияния взволнованная поверхность моря, воздействие экранных сил, зависящих от глубины погружения, скорости хода и курсового угла движения к направлению волн. Влияние волновых помех приводит к уменьшению компенсационных возможностей органов управления. Режим движения « без хода» относится к числу наиболее важных, так как в этом случае изменяется масса ПА и присоединённые массы из-за изменения формы погруженного объёма. Следствием этого возможно появление больших углов крена, дифферента ПА и его провала за предельную глубину.

Глайдер как один из вариантов универсального ПА отличается тем, что он не имеет двигателя, а его перемещение в воде осуществляется за счет изменения плавучести и горизонтального скольжения. Он периодически погружается и вновь всплывает на поверхность, чтобы сверить координаты и получить обновленные управляющие команды. Традиционная компоновка ПАГ включает горизонтальные и вертикальные рули, устройство изменения остаточной плавучести. Изменение углов наклона носовой части и поворота осуществляется за счет перемещения блоков с источниками питания внутри корпуса миниатюрной субмарины. Следовательно, глайдеру принципиально доступны режимы невозмущённого и возбуждённого движения, как и традиционному ПА, но основным режимом является режим погружения и всплытия путём изменения плавучести и изменения угловых пространственных координат. В связи с этим динамическая модель ПА может быть разработана на основе уравнений динамики универсального ПА с учётом указанных особенностей режимов его движения. Основной подход при разработке динамической модели заключается в трансформации моделей движения универсального ПА для режимов движения глайдера.

2.1. Математическая модель глайдера как объекта управления движением в пространстве

3.1.1. Математическая модель глайдера как объекта управления его движением в вертикальной плоскости

Разработке классической теории ПА посвящены труды ряда отечественных и зарубежных учёных, среди которых особое место занимают работы профессоров ЛКИ (СПбГМТУ) В. В. Рождественского, Д. П. Скобова, Е. Н. Розенвассера [4,5]. В этих работах развита теория ПЛ различного типа, что позволяет её считать классической теорией универсальных ПА с различными гидродинамическими формами. Глайдер при этом целесообразно рассматривать как один из вариант универсального ПА. В классической теории детально рассмотрены методы построения нелинейных и линеаризованных математических моделей ПЛ с различными конструктивными реализациями и их режимами движения как в отдельных плоскостях (вертикальной, горизонтальной, при погружении), так и пространстве. Обратимся к разработке линеаризованных уравнений движения глайдера в пространстве, включающих уравнения движения в вертикальной, горизонтальной плоскостях и в режимах погружения/всплытия, на основе результатов классической теории. В качестве входных параметров рассматриваются углы перекладки рулей: горизонтальных - u_{ψ}, вертикального $\delta_{в}$ и устройства изменения остаточной плавучести $u_{р}$. При моделировании АНПА принимаются следующие допущения: скорость движения постоянная, изменение угла атаки малое, тяга гребных винтов равна по модулю сопротивлению, гидродинамические коэффициенты разлагаются в ряд Маклорена и ограничиваются только линейными членами. С учётом принятых допущений и исключения членов, соответствующих уста-

новившемуся движению, нелинейные системы уравнения приводятся к линеаризованному виду [4-7].

$$\begin{cases} \dot{\alpha} + S_{20}\alpha - r_{21}\dot{\psi} - q_{20}\eta = b_{\psi\alpha}u_{\psi} + b_{p\alpha}u_p \\ \ddot{\psi} + r_{61}\dot{\psi} + r_{60}\psi - S_{60}\alpha + q_{60}\eta = b_{\psi\psi}u_{\psi} + b_{p\psi}u_p \end{cases} \quad (1)$$

$$\dot{\alpha} = \frac{dx}{d\tau},\ \dot{\psi} = \frac{d\psi}{d\tau}, \ddot{\psi} = \frac{d^2\psi}{d\tau^2},$$

где α- угол атаки, ψ - угол дифферента, остальные обозначения- гидродинамические коэффициенты.

Написанные выше уравнения характеризуют возмущенное движение глайдера в вертикальной плоскости относительно некоторого установившегося режима движения при заданных начальных условиях, законах перекладки горизонтальных рулей u_{ψ} и определённом значении плавучести u_p, неизвестными в которых являются угол атаки α и угол дифферента ψ. Однако эти уравнения могут считаться моделью движения глайдера в вертикальной плоскости только при допущении, что остаточная плавучесть (координата u_p) является переменной и связана определённой функциональной зависимостью с глубиной погружения.

3.1.2. Математическая модель глайдера как объекта управления его погружением и всплытием

В связи с эти необходимо уравнения (1) дополнить уравнением погружения глайдера

$$m\left(1+k_{22}\right)\ddot{\eta} + C_{y_1}\left(\alpha,\beta\right)\frac{\rho V^{2/3}}{2}\dot{\eta} - K_{\psi}\psi + K_{\alpha}\alpha = b_{\eta}u_p \quad (2)$$

где $\dot{\eta}$ –скорость изменения глубины погружения. Или, объединяя уравнения (1) и (2), будем иметь

$$\begin{cases} \dot{\alpha} + S_{20}\alpha - r_{21}\psi = b_{\psi\alpha}u_{\psi} + b_{p\alpha}u_p \\ \ddot{\psi} + r_{61}\psi + r_{60}\psi - S_{60}\alpha = b_{\psi\psi}u_{\psi} + b_{p\psi}u_p \\ m(1+2k_{22})\ddot{\eta} + C_{y1}(\alpha,\beta)\frac{\rho V^{2/3}}{2}\dot{\eta} = b_{\eta}u_p \end{cases} \quad (3)$$

η - глубина погружения,

ψ - угол дифферента,

α - угол атаки,

u_{ψ} - управление по углу дифферента,

u_p - управление по остаточной плавучести.

Полученные уравнения движения гайдера в вертикальной плоскости (3) должны удовлетворять критериям управляемости и наблюдаемости. Эти критерии для модели (3) не выполняются, и, следовательно, модель необходимо изменить. Для выполнения критериев необходимо в уравнения для угла дифферента и атаки добавить переменную по глубине с определенными коэффициентами, в уравнение по глубине – переменные по углу дифферента и атаки. Тогда будем иметь где $q_{20}, q_{60}, K_{\psi}, K_{\alpha}$ - обозначение коэффициентов взаимосвязи.

$$\begin{cases} \dot{\alpha} + S_{20}\alpha - r_{21}\dot{\psi} - q_{20}\eta = b_{\psi\alpha}u_{\psi} + b_{p\alpha}u_p \\ \ddot{\psi} + r_{61}\dot{\psi} + r_{60}\psi - S_{60}\alpha + q_{60}\eta = b_{\psi\psi}u_{\psi} + b_{p\psi}u_p \\ m\left(1+k_{22}\right)\ddot{\eta} + C_{y_1}\left(\alpha,\beta\right)\frac{\rho V^{2/3}}{2}\dot{\eta} - K_{\psi}\psi + K_{\alpha}\alpha = b_{\eta}u_p \\ \dot{\beta} + S_{40}\beta + r_{42}\ddot{\varphi} + r_{41}\dot{\varphi} = c\delta_{в} \\ \ddot{\varphi} + r_{51}\dot{\varphi} + S_{51}\dot{\beta} + S_{50}\beta = d\delta_{в} \end{cases} \quad (4)$$

Следовательно, глайдер как объект управления движением в вертикальной плоскости является многомерным объектом. Математическую модель его – система дифференциальных уравнений пятого порядка с координатами - угол дифферента, скорость его изменения, угол атаки, глубина и скорости её изменения, а также двумя управлениями по дифференту и остаточной плавучести. Возможны различные подходы к синтезу алгоритмов управления таким объектом. В случае слабых связей между процессами изменения остаточной плавучести и дифферента управление ПАГ можно осуществлять с помощью двух автономных систем – управление только остаточной плавучестью и управление только дифферентом. При наличии связей следует разрабатывать одну многомерную систему.

3.1.3. Математическая модель глайдера как объекта управления движением в горизонтальной плоскости

Уравнения движения глайдера в горизонтальной области имеют вид

$$\begin{cases} \dot{\beta} + S_{40}\beta + r_{42}\ddot{\varphi} + r_{41}\dot{\varphi} = c\delta_{в} \\ \ddot{\varphi} + r_{51}\dot{\varphi} + S_{51}\dot{\beta} + S_{50}\beta = d\delta_{в} \end{cases} \quad (5)$$

где β - угол дрейфа, φ - угол курса, $\delta_{в}$ - управление по курсу, остальные обозначения относятся к гидродинамическим коэффициентам.

3.1.4. Математическая модель глайдера как объекта управления его движением в пространстве

Упрощённая линеаризованная гидродинамическая модель глайдера при движении его в пространстве включает три группы уравнений:

- движения в вертикальной плоскости

$$\begin{cases} \dot{\alpha} + S_{20}\alpha - r_{21}\dot{\psi} - q_{20}\eta = b_{\psi\alpha}u_{\psi} + b_{p\alpha}u_p \\ \ddot{\psi} + r_{61}\dot{\psi} + r_{60}\psi - S_{60}\alpha + q_{60}\eta = b_{\psi\psi}u_{\psi} + b_{p\psi}u_p \end{cases} \quad (6)$$

-погружения/всплытия

$$m(1+k_{22})\ddot{\eta}+C_{y_1}(\alpha,\beta)\frac{\rho V^{2/3}}{2}\dot{\eta}-K_{\psi}\psi+K_{\alpha}\alpha=b_{\eta}u_{p},$$

- движения в горизонтальной плоскости

$$\dot{\beta}+S_{40}\beta+r_{42}\ddot{\varphi}+r_{41}\dot{\varphi}=c\delta_{в}$$

$$\ddot{\varphi}+r_{51}\dot{\varphi}+S_{51}\dot{\beta}+S_{50}\beta=d\delta_{в}$$

Таким образом, глайдер как объект управления его движением в пространстве имеет математическую модель в виде системы дифференциальных уравнений 8 порядка с координатами - угол дифферента, скорость его изменения, угол атаки, глубина и скорости её изменения, углы дрейфа, курса и скорости его изменения, а также тремя управлениями по дифференту, курсу и остаточной плавучести.

3.2. Исполнительные механизмы и регулирующие органы

Важнейшей системой глайдера является механизм изменения плавучести (МИП). Его назначение состоит в изменении веса или объема аппарата, что позволяет управлять плавучестью глайдера и в зависимости от знака плавучести обеспечивать его погружение или всплытие. Рассмотрены варианты МИП, размещенного в поливинилхлоридном цилиндрическом корпусе длиной 1 м и диаметром 0,1 м., в том числе с использованием:

- двух (эластичной внешней и жесткой внутренней) емкостей и двунаправленного насоса;
- тех же емкостей и однонаправленного насоса;
- линейного привода с выдвигающимся поршнем и мембраной;
- поршневого насоса и эластичной внешней емкости;
- внешнего насоса и эластичной внутренней емкости.

С учетом технических характеристик (тип насосов и приводов, расходные характеристики, расчетное давление) оборудования наилучшим был признан третий вариант МИП.

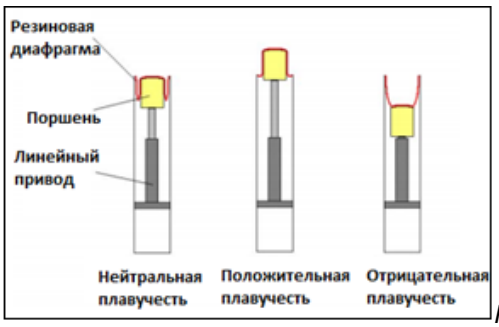


Рис.1. Механизмы изменения плавучести.

3.3. Аналитическая разработка оптимальных регуляторов (АКОР)

Для синтеза алгоритма управления используем метод аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР). Линеаризованная математическая модель движения глайдера в пространстве (6) может быть записана в виде модели пространства состояний [8]:

$$\begin{aligned}\dot{x}&=Ax+Bu\\ y&=Cx+Du\end{aligned}\qquad(7)$$

где *x* – вектор состояния; *u* – вектор входа; *y* – вектор выхода, *A,B,C,D* – матрицы коэффициентов соответствующих размерностей.

Для аналитического конструирования регуляторов - расчёта коэффициентов оптимального закона управления в пакете Matlab используется функция lqr

[K,S,E] =lqr (A,B,Q,R), [K,S,E] = lqr (A,B,Q,R,N)

Функция [K,S,E] = lqr (A,B,Q,R,N) рассчитывает матрицу коэффициентов обратных связей K, такую, что закон управления *u* = -*Kx* минимизирует квадратичный критерий качества.

Функционал (квадратичный критерий качества) имеет вид

$$J=\int_0^{\infty}\left(X^TQX+U^TR_1U+U^TR_2\dot{U}\right)dt,\qquad(8)$$

где *Q, R, R₁, R₂* симметричные вещественно положительно определенные матрицы соответственно размерности *nxn*, *mxm*, *mxm, mxm*. Если аргумент *N* опущен, то по умолчанию N = 0.

В дополнение к матрице коэффициентов обратных связей K возвращается решение S непрерывного уравнения Рикатти

$$A^TS+SA-(SB+N)R^{-1}(B^TS+N^T)+Q=0$$

и собственные значения матрицы замкнутой системы *e = eig(A — BK)*. При этом матрица *K* определяется выражением

$$K=R^{-1}(B^TS+N^T)\qquad(9)$$

Необходимо особо отметить, что расчёт коэффициентов оптимального управления матрицы *K*, при котором минимизируется квадратичный критерий качества интегрального вида, требует решения приведённого выше нелинейного алгебраического уравнения Рикатти. В связи с этим для аппаратной реализации системы должна использоваться микропроцессорная элементная база.

4. Результаты расчёта

Расчёт и имитационное моделирование выполнялись применительно к глайдеру со следующими параметрами - длина 3,2м, максимальный диаметр 0,25 м., размах крыла 1.8 м., водоизмещение 130 кг., тело торпедной формы оснащено двусторонними крыльями, максимальная скорость с тягой 2 м/с и 0,5 м/с при планировании.

На рисунке 2 представлены графики переходных процессов при движения глайдера в вертикальной плоскости в связанной системе координат, рисунок 3 - в неподвижной системе координат.

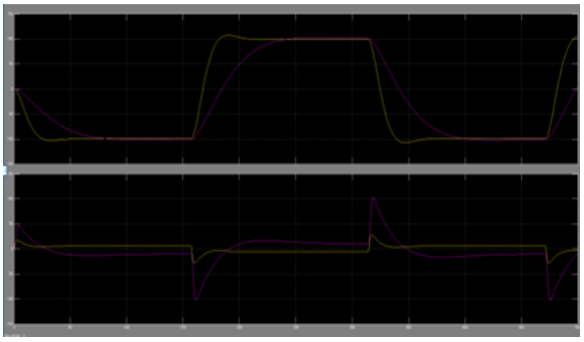


Рис. 2. Графики переходных процессов при движении глайдера в вертикальной плоскости в связанной системе координат, верхний рисунок – переходные процессы по глубине, нижний – переходные процессы по дифференту при различных вариантах исполнительных механизмов (ПА находится на глубине 100м., задание на движение - погружение, задержка, затем всплытие, задержка, далее – погружение до 200м , задержка и т.д.)

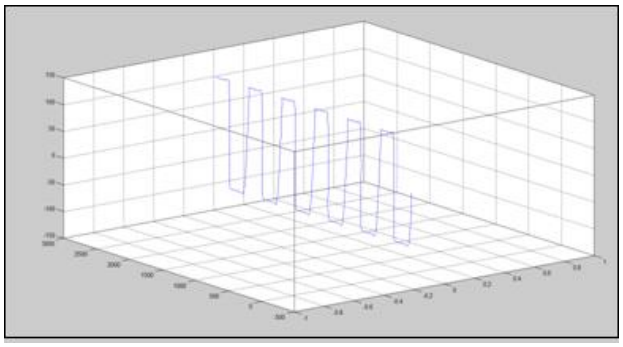


Рис. 3. Траектории движения глайдера подводного аппарата в вертикальной плоскости в неподвижной системе координат (погружение, задержка, всплытие, задержка).

На рисунках 4,5 представлены варианты пространственного движения подводного аппарата.

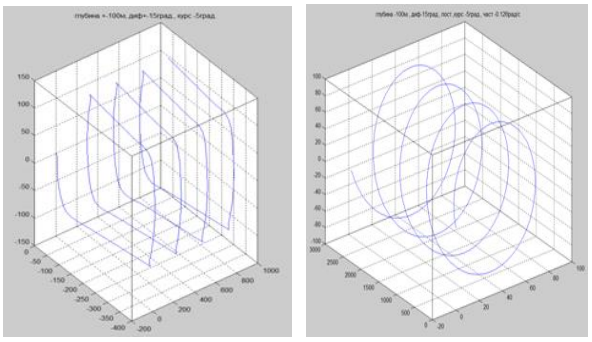


Рис. 4. Траектории пространственного движения подводного аппарата (вариант -погружение, задержка, всплытие , задержка).
Рис. 5. Траектории движения подводного аппарата в вертикальной плоскости (вариант – погружение, всплытие без задержки).

Как следует из вида рисунков, переходные процессы устойчивы, имеют монотонный характер, время переходных процессов при этом может устанавливаться соответствующим выбором коэффициентов матрицы В в уравнениях (7).

Результаты имитационного моделирования подтверждают правильность принятых решений при создании системы автоматического оптимального управления пространственным движением подводного аппарата типа глайдер.

Заключение

В работе представлены результаты по разработке системы автоматического оптимального управления пространственным движением автономного необитаемого подводного аппарата типа глайдер на основе применения классической теории подводных аппаратов. Разработана математическая модель глайдера как объекта управления его движением, приведены алгоритмы оптимального управления движением в вертикальной плоскости и пространстве, выполнена проверка эффективности разработанных алгоритмов путём имитационного моделирования. В целом, полученные результаты позволяют сделать вывод о работоспособности и эффективности разработанной системы управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бочаров Л.* Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития. //Микроробототехника - Электроника. Наука, технология, бизнес. - 2009. - №7.
2. *Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А.* Устройства и системы управления подводных роботов. М.: Наука, 2005.
3. *Агеев М.Д., Киселев Л.В.* Есть ли экзотика в морских технологиях. //Вестник Российской Академии Наук. - 2005. - том 75. - № 8.
4. *Рождественский В.В. Квасников В.Н., Савельев М.В.* Установившееся движение ПЛ без хода под действием остаточной плавучести. //Кораблестроение, 1958, №14.
5. *Скобов Д.П., Калачёва Л.В.* Динамика ПЛ. Изд. ЛКИ, 1960.
6. *Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А.* Навигация и управление движением судов. Элмор, СПб, 2002.
7. *Данишевский Б.В., Ильин Г.Г.* Системы автоматического управления общекорабельными системами и движением подводных лодок. Л,:ВВМИОЛУ им. Ф.Э. Дзержинского, 1978.

8. *Красовский А. А.* Избранные труды: //Самые ранние – самые новые. А. А. Красовский. Издательство: Наука, 2003 г.

References

1. *L. Bocharov.* Unmanned underwater vehicles: the state and the general development trend. //Mikrorobototehnika - Electronics. Science, Technology, Business. - 2009. - №7.
2. *Filaretov V.F., Lebedev A.V., Yukhimets D.A.* Devices and underwater robots control system. M: Nauka, 2005.
3. *Ageev M.D., L.V. Kiselev.* Do exotic marine technologies . //Herald of the Russian Academy of Sciences. - 2005. - Volume 75. - № 8.
4. *Christmas V.V., Kvasnikov V.N., M.V. Saveliev.* Steady submarine motion without progress under the influence of residual buoyancy. Ship building, 1958, №14.
5. *Skobov D.P., Kalacheva L.V.* Dynamics of the submarine. Ed. LKI, 1960.
6. *Lukomsky Y.A., Peshekhonov V.G., Skorohodov D.A.* Navigation and Motion Control of Ship., Elmor, St. Petersburg, 2002.
7. *Danishevskii B.V., Ilyin G.G.* Automatic Control Systems general ship systems and the movement of submarines. L,: VVMIOLU them. FE Dzerzhinsky 1978.
8. *Krasovsky A.A.* Selected Works: //The oldest – newest., A.A. Krasovskii. *Publisher: Nauka, 2003.*

УДК 531.14

РЕШЕНИЕ ВАРИАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МАССЫ РАБОЧЕГО ТЕЛА РЕАКТИВНО-ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ДВИЖИТЕЛЯ

Сергеев Максимильян Сергеевич
аспирант кафедры теплофизических основ судовой энергетики,
Санкт – Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: mart_iden@inbox.ru

Аннотация

Приведено решение вариационной задачи по определению оптимальной зависимости изменения массы рабочего тела реактивно – пневматического движителя арктического спасательного средства от времени. На основании решения вариационной задачи на условный экстремум, была получена функциональная зависимость изменения массы газа в баллонах от времени, дающая максимум (минимум) пройденного спасательным средством пути по поверхности ледового покрова. Характер экстремума был определен на основании достаточного условия Лежандра. Решение вариационной задачи на определение оптимальной зависимости изменения массы рабочего тела реактивно – пневматического движителя позволяет подобрать орган регулирования истечения газа таким образом, чтобы выполнялись необходимые условия по оптимизации пройденного пути. Кроме того, найденная на основании вариационных методов зависимость изменения массы газа в баллонах от времени может существенно упростить исследование устойчивости движения арктического спасательного средства.

Ключевые слова: вариационная задача, экстремум, условие Лежандра, неголономная связь, истечение, пройденный путь, скорость

SOLUTION OF THE VARIATIONAL PROBLEM OF DETERMINING THE OPTIMAL DEPENDENCE OF MASS CHANGE WORKING MEDIUM REACTIVE–PNEUMATIC MOVER

Sergeev Maksimilyan Sergeevich
postgraduate student of the department of thermal engineering basics
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: mart_iden@inbox.ru

Abstract

This article presents a solution of the variational problem of determining the optimal dependence of mass change working medium reactive – pneumatic mover of life arctic saving equipment. Functional dependence of changing the density of the gas in the cylinders vs the time was found on the basis of variational problem on a conditional extremum. This functional dependence gives the maximum (minimum) distance covered of life saving equipment on the surface of the sheet of ice. The nature of the extremum is determined based on the sufficient condition of Legendre. Solution of the variational problem of determining the optimal dependence of mass change working medium reactive – pneumatic mover allows finding regulation of the gas escape so as to satisfy the condition optimize the traversed path. Moreover found the dependence of the density of the gas in the cylinders of time can greatly simplify the investigation the stability of motion of the life arctic saving equipment.

Keywords: variational problem, extremum, conditional of Legendre, nonholonomic constraint, efflux, distance covered, velocity.

Введение

В работе [1] приводится описание спасательного средства с реактивно – пневматическим движителем. Истекающие из баллонов со сжатым газом струи создают реактивную силу, обеспечивающую движение этого средства и его перемещение на некоторое удаление от места аварии. Изменение характера истечения, а следовательно и характера движения, зависит от режима изменения массы газа в баллонах, достигаемого за счет работы системы регулирования процесса истечения. Возникает вопрос о величине пройденного пути в зависимости от этого режима истечения.

Для решения этой задачи воспользуемся методами вариационного исчисления, которые относятся к наиболее естественным и адекватным способам определения оптимальных режимов изменения параметров каких – либо механических систем.

Сформулируем вариационную задачу следующим образом:

Найти зависимость изменения массы газа в баллонах (закон программирования реактивной силы), при которой путь L, пройденный спасательным средством со скоростью $\nu(t)$ будет принимать максимальное (минимальное) значе-ние. Это условие можно представить в следующем виде:

$$L = \int_{t_1}^{t_2} \nu dt, \quad (1)$$

где $[t_1, t_2]$ - интервал времени, связанный с докритическим режимом истечения газа.

Запишем уравнение Мещерского для спасательного средства в следующем виде:

$$(m_{Тб} + 2V\rho)\frac{d\nu}{dt} = -f(m_{Тб} + 2V\rho)g - 2wV\frac{d\rho}{dt}, \quad (2)$$

где f - коэффициент трения скольжения, w - скорость истечения газа из баллонов, V - объем баллона с газом, $m_{Тб}$ - суммарная масса тележки и двух баллонов с газом, ρ - плотность закаченного в баллоны газа в момент времени t, g - ускорение свободного падения.

Динамика истечения газа из баллона определяется уравнением [3]:

$$V\frac{d\rho}{dt} = -G = -\varphi\rho F w, \quad \varphi = c_d \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{2,5}, \quad (3)$$

где G - массовый расход газа, φ - коэффициент, связывающий расход и скорость при изоэнтропическом истечении газа, c_d - коэффициент расхода, зависящий от конструкции соплового устройства, k - показатель адиабаты.

Представим выражение для скорости истечения газа из баллонов через функцию плотности используя соотношения (3):

$$w = -\frac{V}{\varphi F}\frac{d\rho}{\rho dt}, \quad (4)$$

где F - площадь сечения сопла.

Используя выражение (4) приведем выражение (3) к следующему виду:

$$(m_{Тб} + 2V\rho)\frac{d\nu}{dt} + f(m_{Тб} + 2V\rho)g - 2\frac{V^2}{\varphi F\rho}\left(\frac{d\rho}{dt}\right)^2 = 0, \quad (5)$$

Решение вариационной задачи об определении оптимальной зависимости измене-ния массы рабочего тела реактивно – пневматического движителя сводится к изучению поведения функционала (1) при дополнительных неголономных связях (5).

Составим следуя [5] вспомогательную функцию:

$$N_1 = N + \sum_{s=1}^{m} \lambda_s(t) P_s, \quad P_s(\rho, \rho', \nu, \nu') = 0, \quad N = \nu, \quad (6)$$

где N - подынтегральная функция функционала (1);

λ_s - соответствующий неопределенный множитель;

P_s - соответствующая неголономная связь.

Конкретизация этих величин приводит к выражению:

$$N_1 = \nu + \lambda(t)\left[(m_{Тб} + 2V\rho)\frac{d\nu}{dt} + f(m_{Тб} + 2V\rho)g - 2\frac{V^2}{\varphi F\rho}\left(\frac{d\rho}{dt}\right)^2\right],$$

Запишем согласно [2] необходимые условия экстремума функционала (1) используя функцию $N_1 = N_1(\rho, \rho', \nu, \nu', \lambda)$:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\frac{\partial N_1}{\partial \rho'} - \frac{\partial N_1}{\partial \rho} = 0, \\ \frac{d}{dt}\frac{\partial N_1}{\partial \nu'} - \frac{\partial N_1}{\partial \nu} = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

Условия (7) в сочетании с неголономной связью (5) дают систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{2V^2\lambda(\rho')^2}{\varphi F\rho^2} - \dfrac{4V^2}{\varphi F\rho}\lambda'\rho' - \dfrac{4V^2}{\varphi F\rho}\lambda\rho'' - 2V\lambda\nu' - 2V\lambda fg = 0, \\ (m_{Тб} + 2V\rho)\lambda' + 2V\rho'\lambda = 1, \\ (m_{Тб} + 2V\rho)\nu' + f(m_{Тб} + 2V\rho)g - 2\dfrac{V^2}{\varphi F\rho}(\rho')^2 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

где λ - неопределенный множитель, $\rho'', \rho', \lambda', \nu'$ - производные по времени функций ρ, λ, ν.

Выразим из последнего уравнения системы (8) производную скорости по времени ν' и подставим в первое уравнение данной системы.

В итоге, после дополнительных алгебраических преобразований первого и третьего уравнений, система (8) принимает вид:

$$\begin{cases} \dfrac{2V^2\lambda(\rho')}{\varphi F\rho^2} - \dfrac{4V^2\lambda'\rho'}{\varphi F\rho} - \dfrac{4V^2\lambda\rho''}{\varphi F\rho} - \dfrac{4V^3\lambda(\rho')^2}{\varphi F\rho(m_{Тб} + 2V\rho)} = 0, \\ (m_{Тб} + 2V\rho)\lambda' + 2V\rho'\lambda = 1, \end{cases} \quad (9)$$

Из второго уравнения системы (8) найдем взаимосвязь между функциями ρ и λ:

$$(m_{Тб} + 2V\rho)\lambda' + 2V\rho'\lambda = 1, \quad \frac{d((m_{Тб} + 2V\rho)\lambda)}{dt} = 1,$$
$$(m_{Тб} + 2V\rho)\lambda = t + C_1, \quad (10)$$

где C_1 - постоянная интегрирования.

Для удобства дальнейших выкладок представим величину λ в следующем виде:

$$\lambda = \frac{t + C_1}{(m_{Тб} + 2V\rho)},$$

Тогда:

$$\frac{d\lambda}{d\tau} = \frac{1}{(m_{Тб} + 2V\rho)} - \frac{2V\tau\rho'}{(m_{Тб} + 2V\rho)^2}, \quad \tau = t + C_1, \quad (11)$$

Подставляя выражения (11) в первое уравнение системы (9) получим нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка относительно функции ρ:

$$t = \tau - C_1, \quad \frac{d\rho}{d\tau}\frac{d\tau}{dt} = \frac{d\rho}{dt},$$

$$\frac{\tau(\rho')^2}{\rho} - 2\rho' + \frac{2V\tau(\rho')^2}{(m_{T6} + 2V\rho)} - 2\tau\rho'' = 0, \qquad (12)$$

Выражение (12) можно переписать в следующем виде:

$$(\rho')^2\tau\left[\frac{1}{\rho} + \frac{1}{(\sigma + \rho)}\right] - 2\rho' - 2\tau\rho'' = 0, \qquad (13)$$

где $$\sigma = \frac{m_{T6}}{2V} >> 1,$$

Далее будем интерполировать выражение в скобках уравнения (13) следующей функцией:

$$\psi(\rho) = \frac{1}{\rho}, \qquad (14)$$

Следует отметить, что справедливость интерполяции напрямую зависит от соотношения между массами конструктивных узлов спасательного средства и закаченного в баллоны газа. В данном случае суммарная масса конструктивных узлов спасательного средства и пустых баллонов существенно превосходит массу газа в баллонах.

С учетом (14) уравнение (13) принимает следующий вид:

$$\frac{(\rho')^2\tau}{\rho} - 2\rho' - 2\tau\rho'' = 0, \qquad (15)$$

Полученное уравнение (15) однородно по ρ, ρ', ρ'', поэтому согласно [6] сделаем следующую подстановку:

$$\frac{\rho'}{\rho} = r, \quad \frac{dr}{d\tau} = \frac{\rho''}{\rho} - r^2, \qquad (16)$$

Используя эту подстановку и простейшие алгебраические преобразования, представим уравнение (15) в следующем виде:

$$2\tau r' + \tau r^2 + 2r = 0, \qquad (17)$$

Чтобы привести уравнение (17) к линейному виду, вновь проведем процедуру замены переменной:

$$r = \frac{1}{\omega}, \quad \text{тогда} \quad \frac{dr}{dt} = \frac{-\omega'}{\omega^2}, \qquad (18)$$

В итоге уравнение (17) принимает вид:

$$-\omega' + \frac{1}{\tau}\omega = -\frac{1}{2}, \qquad (19)$$

Интегрирование выражения (19) приводит к зависимости:

$$\omega(\tau - C_1) = \frac{1}{2}In\tau\cdot\tau + C_2\tau, \qquad (20)$$

Используя преобразования (16) и (18), получим дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$\frac{\rho'}{\rho} = \frac{2}{In\tau\cdot\tau + 2C_2\tau}, \qquad (21)$$

Решение этого уравнения можно представить в виде:

$$In\rho = 2\int\frac{d\tau}{In\tau\cdot\tau + 2C_2\tau} + C_3, \qquad (22)$$

Интегрирование правой части и последующее потенцирование дает зависимость:

$$\rho(t) = C_3(In(t + C_1) + 2C_2)^2,$$

Для того, чтобы аргумент натурального логарифма не имел размерности времени, поделим его на "обезразмеривающий" множитель $t_o = 1$, с.

$$\rho(t) = C_3\left(In\left(\frac{t + C_1}{t_o}\right) + 2C_2\right)^2, \qquad (23)$$

Постоянные интегрирования C_2 и C_3 определим при помощи граничных условий:

$$\rho(0) = 246{,}66 \text{ кг/м}^3, \quad \rho(10) = 9{,}15 \text{ кг/м}^3, \qquad (23)$$

Представим в графическом виде выражение (23) для нескольких значений $C_1 \in N$ на рис.1.

Значения постоянных интегрирования C_2, C_3 в зависимости от C_1 представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значения постоянных C_2, C_3 в зависимости от C_1

C_1, с	C_2	C_3, кг/м^3
1	-1,48495	27,96491
2	-1,45616	50,08578
3	-1,45736	74,78358

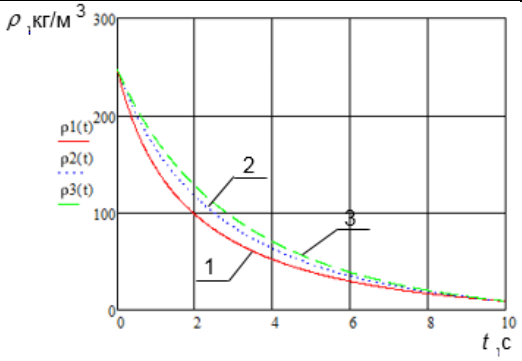


Рис. 1. Графики функции $\rho_i = \rho_i(t)$ при различных значениях постоянных интегрирования C_1

Для однозначного определения постоянной интегрирования C_1 необходимо ввести дополнительное условие:

- скорость спасательного средства достигает своего максимального значения в момент времени окончания докритического режима истечения газа $t = 10$, с.

На основании этого дополнительного условия определим постоянную интегрирования C_1.

Для этого запишем следующую систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} C_3\left(In\left(\frac{C_1}{t_o}\right)+2C_2\right)^2 = 246{,}66, \\ C_3\left(In\left(\frac{10+C_1}{t_0}\right)+2C_2\right)^2 = 9{,}15, \\ \frac{8V^2C_3}{\varphi F\left(\frac{10+C_1}{t_0}\right)^2(m_{T6}+18{,}3V)} = fg, \end{cases} \quad (24)$$

Выделяя C_3 из первого уравнения системы (24) и подставляя во второе уравнение получим следующее выражение:

$$950{,}04C_2^2 + C_2\left(986{,}64\ln\left(\frac{10+C_1}{t_0}\right) - 36{,}6\ln\left(\frac{C_1}{t_o}\right)\right) +$$

$$+ 246{,}66\left(\ln\left(\frac{10+C_1}{t_0}\right)\right)^2 - 9{,}15\left(\ln\left(\frac{C_1}{t_o}\right)\right)^2 = 0, \quad (25)$$

Решая полученное уравнение относительно C_2 и подставляя решение в третье уравнение системы (24) получим следующие значения постоянных интегрирования:

$$C_1 = 230,\ C_2 = -2{,}74539\ C_3 = 8877251 \quad (26)$$

Прежде чем перейти к непосредственному интегрированию уравнения движения, выясним какой экстремум принимает функционал (1).

Для этого воспользуемся достаточным условием Лежандра [2].

$$\frac{\partial^2 v(\rho,\rho')}{\partial(\rho')^2} \le 0 \ \max L, \quad \frac{\partial^2 v(\rho,\rho')}{\partial(\rho')^2} \ge 0 \ \min L, \quad (27)$$

Представим функционал скорости в следующем виде:

$$v(\rho,\rho') = \frac{2V^2}{\varphi F}\int\left(\frac{(\rho')^2}{\rho(m_{T6}+2V\rho)} - \frac{fg\varphi F}{2V^2}\right)dt + C_4, \quad (28)$$

Условие Лежандра для функционала (28), принимает вид:

$$\frac{\partial^2 v(\rho,\rho')}{\partial(\rho')^2} = \frac{4V^2}{\varphi F}\int\frac{dt}{\rho(m_{T6}+2V\rho)} \ge 0, \ \min L \quad (29)$$

Поскольку подынтегральная функция в выражении (29) является возрастающей на промежутке $[t_1, t_2]$, то, используя теорему о среднем, можно увидеть выполнение этого неравенства.

После того, как были определены постоянные интегрирования C_1, C_2 и C_3 в выражении (23) запишем уравнение прямолинейного движения спасательного средства:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{8V^2C_3}{\varphi F(t_0)^2\left(\frac{t+C_1}{t_o}\right)^2\left(m_{T6}+2VC_3\left(In\left(\frac{t+C_1}{t_o}\right)+2C_2\right)^2\right)} - fg,$$

или

$$\frac{dv}{dt} = \frac{8V^2C_3}{\varphi F(t_0)^2\left(\frac{t+C_1}{t_o}\right)^2 m_{T6}} - fg, \quad (30)$$

Выражение (30) после интегрирования с учетом условия $v(0)=0$ принимает вид:

$$v = -\frac{8V^2C_3}{(t_0)\varphi F m_{T6}\left(\frac{t+C_1}{t_0}\right)} - fgt + \frac{8V^2C_3}{(t_0)\varphi F\left(\frac{C_1}{t_0}\right)m_{T6}}, \quad (31)$$

Выражение (31) после интегрирования с учетом условия $x(0)=0$ принимает вид:

$$x = -\frac{8V^2C_3\,In\left(\frac{t+C_1}{t_o}\right)}{\varphi F m_{T6}} - \frac{fgt^2}{2} +$$

$$+ \frac{8V^2C_3t}{(t_0)\varphi F\left(\frac{C_1}{t_0}\right)m_{T6}} + \frac{8V^2C_3\,In\left(\frac{C_1}{t_0}\right)}{\varphi F m_{T6}}, \quad (32)$$

Представим на рис. 2 зависимости координаты от времени при различных значениях диаметра сопла и для экстремального случая.

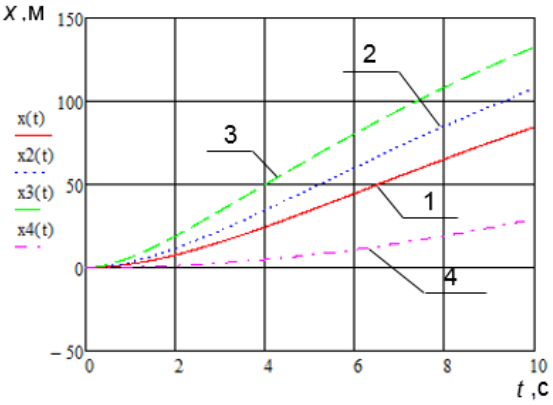


Рис. 2. Изменение координаты от времени при различных значениях диаметра сопла и для экстремального случая

1 - $d = 0{,}04$, м, 2 - $d = 0{,}05$, м, 3 - $d = 0{,}07$, м,
4 – экстремальный случай

Заключение

В результате анализа дифференциального уравнения (16) были сделаны следующие выводы:

- полученная зависимость (23) изменения массы газа в баллонах обеспечивает минимум функционала (1);

- использование полученной зависимости изменения массы газа в баллонах при определении параметров движения спасательного средства, позволит оптимизировать конструкцию и снизить иск невыхода за радиус поражения;

- полученная на основании вариационных методов зависимость изменения массы газа в баллонах существенно упрощает исследование устойчивости движения спасательного средства.

Литература

1. Таровик В.И., Вальдман Н.А., Павловский В.А., Карелин А.А., Буракова Е.А., Рап М.М. Аварийное спасательное средство для экстренной эвакуации персонала с морских платформ в ледовых условиях. Труды Крыловского государственного научного центра. СПО.2013. Выпуск 74 (358). С.107-116.
2. Гельфанд И.М., Фомин С.В., Вариационное исчисление. М.:Издательство "ГИФМЛ" 1961 г. 226 с.
3. Павловский В.А. Введение в термодинамику реальных газов: Монография/ СПб.:ФГУП "Крыловский государственный научный центр". 2013. 230 с
4. Космодемьянский. А.А. Курс теоретической механики (часть 1). М.: Издательство "Просвещение". 1965 г. 243 с.
5. Космодемьянский. А.А. Курс теоретической механики (часть 2). М.: Издательство "Просвещение". 1966 г. 402 с.
6. Федорюк М.В. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985 г. 448 с.

References

1. Tarovik V.I., Val'dman N.A., Pavlovskij V.A., Karelin A.A., Burakova E.A., Rap M.M. Avarijnoe spasatel'noe sredstvo dlja jekstrennoj jevakuacii personala s morskih platform v ledovyh uslovijah. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra. SPO.2013. Vypusk 74 (358). S.107-116.
2. Gelfand I.M., Fomin S.V., Variacionnoe ischislenie. M.:Izdatel'stvo "GIFML" 1961 g. 226 s.
3. Pavlovskij V.A. Vvedenie v termodinamiku real'nyh gazov: Monografija. SPb.:FGUP "Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj centr". 2013. 230 s.
4. Kosmodem'janskij. A.A. Kurs teoreticheskoj mehaniki (chast' 1). M.: Izdatel'stvo "Prosveshhenie". 1965 g. 243 s.
5. Kosmodem'janskij. A.A. Kurs teoreticheskoj mehaniki (chast' 2). M.: Izdatel'stvo "Prosveshhenie". 1966g. 402 s.
6. Fedoryuk M.V. Obyknovennye ifferencial'nye uravneniya. M.: Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoj literatury, 1985 g. 448 s.

Управление и обработка информации

УДК 004.932.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСТАНЦИИ ДО ТОЧЕК ПОДВОДНОГО ДНА ПО СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЮ

Сиек Юрий Леонардович
доктор технических наук, заведующий кафедрой САУ и БВТ
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: siek@mail.ru

Борисов Александр Николаевич
младший научный сотрудник
Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук
199178, Санкт-Петербург, В.О., 12 линия, д. 13
e-mail: bor_fond93@mail.ru

Аннотация

В статье исследуется погрешность определения дистанции до точек подводного дна по изображениям, получаемым от системы видеонаблюдения, обладающей свойством стереозрения. Рассматривается влияние таких параметров камер, как разрешение, фокусное расстояние и угол обзора. Излагаются принципы организации стереозрения в системах видеонаблюдения. Отмечается возможность выделения соответствующих точек по изображениям. Для определения дистанции выбран триангуляционный метод. Заданы необходимые системы координат. Приведены расчетные формулы, учитывающие эффект скрещивающихся прямых. Для исследования точности определения дистанции проведено имитационное моделирование подводной видеосъемки. Решалась задача определения координат точек дна по двум кадрам. Получены зависимости ошибки определения дистанции до точек дна для камер с разными параметрами. Результаты исследования могут найти применение при проектировании систем видеонаблюдения, предназначенных для подводных аппаратов различного назначения, выполняющих работы вблизи дна

Ключевые слова: системы технического зрения, стереозрение, видеонаблюдение, определение расстояния, карта глубин, оценка погрешности

THE RESEARCH OF ERROR FOR DETERMINING A DISTANCE TO UNDERWATER BOTTOM POINTS ON STEREOIMAGE

Siek Jurij Leonardovich
Dr.Sci.Tech, head of a departament of automatic control systems and ondoard computer technology
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: siek@mail.ru

Borisov Aleksandr Nikolaevich
junior researcher
Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences
12 line, h. 13, V.I., St. Petersburg 199178, Russian Federation
e-mail: bor_fond93@mail.ru

Abstract

In article we research an error of determination of a distance to points of an underwater bottom using images which are received from system of video surveillance which possesses property of stereovision. We consider influence of such parameters of cameras as resolution, focal length and viewing angle. The principles of the organization of stereovision in systems of video surveillance are explained.

Possibility of determination of the appropriate points using images is marked. For determination of a distance the triangulation method is selected. Necessary coordinate systems are set. Formulas which consider effect of skew lines are given. For research of accuracy of calculation we carried out simulation modeling of underwater video filming. Also the problem of determination of coordinates of observed points on two frames was solved. We received dependences of an error of determination of a distance to bottom points for cameras with different parameters. Results of research can find application in case of design of the systems of video surveillance intended for the underwater robots performing works near an underwater bottom

Key words: image processing, vision system, stereovision, video monitoring, distance-finding, depth map, error estimate.

Введение

В настоящее время распознавание движущихся объектов, идентификация и определение их положения в пространстве являются необходимыми функциями систем технического зрения (СТЗ) динамических объектов различного назначения. Подобными системами оборудованы космические, воздушные и морские (наземные и подводные) транспортные средства [1]. Одним из основных элементов СТЗ является система видеонаблюдения, поддерживающая функцию стереозрения. Использование поступающей от нее информации расширяет возможности трехмерной реконструкции сцены, а также решения задач поиска, распознавания и классификации объектов по поступающим изображениям. В последнее время перспективным признается использование видеоданных для организации процесса управления движением объектов [2]. Важным требованием к алгоритмическому обеспечению систем видеонаблюдения является наличие возможности определения дистанции до отдельных элементов наблюдаемой сцены. Формируемые в реальном масштабе времени результаты в первую очередь используются для решения задач ориентации и позиционирования динамических объектов. Принципиальное влияние на качество организуемого на основе получаемых оценок дистанции управляемого процесса оказывает достигаемая точность ее определения.

Существует несколько подходов к определению дистанции до наблюдаемых на изображении элементов сцены. Они отличаются областью применения и объемом необходимых исходных данных. В статье [3] описывается и исследуется метод определения расстояния до объекта с использованием априорных знаний о его размере. Для его реализации требуется всего одна камера.

В случае отсутствия сведений о размерах наблюдаемого элемента сцены применяется триангуляционный метод. В этом случае необходимо, чтобы система видеонаблюдения обладала возможностью стереозрения.

В данной статье исследуется погрешность триангуляционного метода определения дистанции до точек, выделяемых на видеоизображениях подводного дна.

1. Модель стереозрения

Стереозрение возможно при наличии в системе видеонаблюдения двух камер. Положение каждой из них определяется центром проецирования O и направлением главной оптической оси. Плоскость, перпендикулярная главной оптической оси и проходящая через центр проекции называется главной. На расстоянии от нее, называемом фокусным, располагается проективная плоскость, на которой формируется изображение. На плоскости вводится двумерная система координат (x,y) . Положение любой точки пространства $\mathrm{A}(X,\mathrm{Y},\mathrm{Z})$ на кадре получается пересечением прямой OA с поверхностью изображения.

Для учета ошибок, вызванных реальным положением плоскости, вводятся два параметра C_X и C_Y , характеризующие сдвиг матрицы изображения относительно оптической оси. Их значения определяются с помощью калибровки [4]. Таким образом, любая точка $\mathrm{A}(X,\mathrm{Y},\mathrm{Z})$ отображаемого пространства на проективной плоскости будет иметь координаты.

$$x_S = f\left(\frac{X}{Z}\right) + C_X \quad (1)$$

$$y_S = f\left(\frac{Y}{Z}\right) + C_Y \quad (2)$$

Для обеспечения стереозрения осуществляется одновременное фотографирование сцены с двух камер. Для выделения соответствующих точек на разных кадрах разработан широкий набор различных детекторов. Одним из эффективных является детектор, реализующий метод Лукаса-Канаде, основанный на расчете оптического потока [4]. Его применение к кадрам, поступающим от двух видеокамер, позволяет решать задачу трехмерной реконструкции наблюдаемой сцены, реализуя следующие этапы: обработка изображений для удаления дисторсионных искажений, поиск соответствующих точек на разных кадрах и построение карты различий, определение координат точек сцены по полученной карте различий.

2. Метод определения дистанции

В общем случае камеры имеют произвольную ориентацию. На рисунке 1 представлена система камер и их положение в пространстве относительно связанной СК подводного аппарата (X,Y,Z). Для вычисления трехмерных координат произвольной точки сцены требуется знать ее пиксельные координаты на обоих кадрах, точки центра проекции обеих камер $O_1(X_1,Y_1,Z_1)$ и

$O_2(X_2,Y_2,Z_2)$, разрешение снимка, фокусное расстояние и матрицы поворота в связанную СК - $A_1[3x3]\,u\,A_2[3x3]$, определяемые углами ориентации камер. В ходе решения строятся две прямые линии через центры проекции и проективные плоскости камер. В общем случае они будут скрещивающимися, поэтому за искомые координаты рационально принять середину их общего перпендикуляра при условии, что его длина меньше порогового значения (рис. 2).

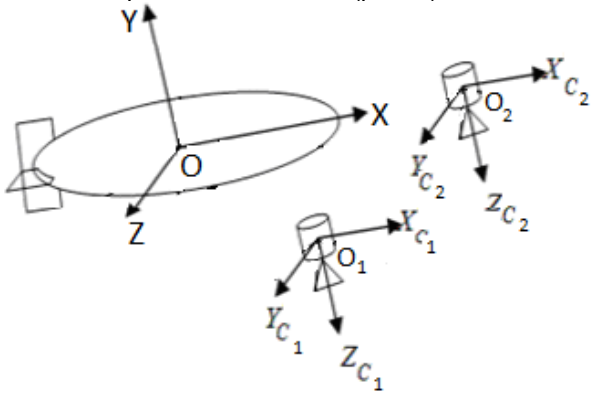


Рис. 1. Система камер.

Для описания метода триангуляции в векторно-матричной форме введем следующие обозначения.

$$L=\begin{bmatrix}X_{c1}\\Y_{c1}\\Z_{c1}\end{bmatrix},R=\begin{bmatrix}X_{c2}\\Y_{c2}\\Z_{c2}\end{bmatrix},Lc=\begin{bmatrix}X_1\\Y_1\\Z_1\end{bmatrix},Rc=\begin{bmatrix}X_2\\Y_2\\Z_2\end{bmatrix} \quad (3)$$

Где L - вектор координат точки на первой экранной плоскости в СК камеры, R - на второй, Lc и Rc - векторы координат двух камер в связанной СК.

Приведем точки первой и второй экранной плоскости к связанной СК, используя для этого матрицу поворота и параллельный сдвиг:

$$K_1=A_2\cdot L+Lc \quad (4)$$

$$K_2=A_2\cdot \mathrm{R}+Rc \quad (5)$$

На основе использования координат точек на проективной плоскости в связанной СК K_1 и K_2, и координат камер, определяются уравнения двух скрещивающихся прямых. Из уравнений вычисляются два направляющих вектора $P1$ и $P2$.

Введем новые обозначения: $\overrightarrow{Pn}=\overrightarrow{P1}\times\overrightarrow{P2}$ - векторное произведение направляющих векторов, вектор $\overrightarrow{M}=\overrightarrow{L_C}-\overrightarrow{R_C}$, $\overrightarrow{W1}$ и $\overrightarrow{W2}$ - векторы координат концов общего перпендикуляра. Для их нахождения прямые представляются в параметрическом виде (6, 7).

$$\overrightarrow{W1}=l*\overrightarrow{P1}+\overrightarrow{L_C}, \quad (6)$$

$$\overrightarrow{W2}=s*\overrightarrow{P2}+\overrightarrow{R_C}. \quad (7)$$

Тогда координатам $\overrightarrow{W1}$ и $\overrightarrow{W2}$ будут соответствовать конкретные значения параметров l и s. Вектор $\overrightarrow{W1W2}$ коллинеарен вектору нормали $\overrightarrow{Pn}$ и может быть выражен через него с коэффициентом пропорциональности λ. Таким образом, можно построить систему линейных уравнений с тремя неизвестными

$$\begin{cases}P2_x s-P1_x t-M_x=\lambda Pn_x,\\P2_y s-P1_y t-M_y=\lambda Pn_y,\\P2_z s-P1_z t-M_z=\lambda Pn_z,\end{cases} \quad (8)$$

В результате решения системы уравнений (8) определяется вектор

$$\vec{U}=\begin{pmatrix}s & l & \lambda\end{pmatrix}^T \quad (9)$$

Подставляя параметры l и s в соответствующие параметрические уравнения прямых (6) и (7), вычисляем координаты концов общего перпендикуляра. Для нахождения положения его середины $H(\mathrm{X}_d,\mathrm{Y}_d,\mathrm{Z}_d)$, воспользуемся формулой

$$\overrightarrow{H}=\frac{(\overrightarrow{W1}+\overrightarrow{W2})}{2} \quad (10)$$

Расстояние между прямыми рассчитывается как длина вектора $\overrightarrow{W1W2}$.

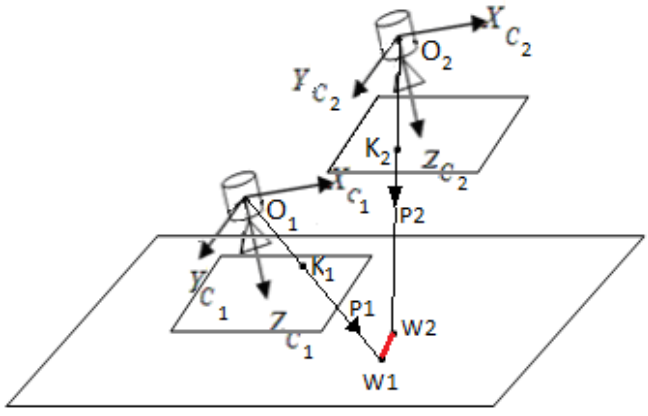


Рис. 2. Общий перпендикуляр.

3. Исследование точности определения дистанции

Одним из основных факторов, влияющих на точность определения дистанции являются ошибки поиска соответствия точек на изображении и дискретность при отображении сцены

Влияние ошибок соответствия можно исключить с помощью порогового значения длины общего перпендикуляра скрещивающихся прямых.

Объективно присутствующая дискретность вызвана тем, что непрерывные координаты реального мира при проективном преобразовании в цифровых видеокамерах транслируются в целочисленные пиксельные координаты экрана.

Для исследования точности определения дистанции с учетом последнего фактора, решалась задача определения координат точек дна по кадрам, поступающим от двух видеокамер СТЗ подводного робота. При фиксированном размере матрицы фокусные расстояния и углы обзора находятся в обратной зависимости. Использовались камеры с матрицей 1/3" и разрешениями 320x240 и 640x480 пикселей. Фокусные расстояния равняются 5мм и 3мм, а горизонтальные углы обзора 56 и 104 градуса соответственно. Результаты получены с помощью математического программного пакета MathCad и проверялись методами имитационного моделирования с помощью "Программы моделирования подводной видеосъемки" [5]. Результаты выделения соответствующих точек на изображениях, полученных от двух камер, приведены на рис. 3.

За ошибку определения дистанции принято среднеквадратичное отклонение рассчитанных координат от истинных значений.

График зависимости ошибки от дистанции до сцены для камер с разными параметрами приведен на рисунке 4.

Для повышения точности вычислений необходимо использовать различные методы обработки изображений. Например, популярная библиотека компьютерного зрения OpenCV [4] предлагает несколько функций для чтения кадров с субпиксельной точностью, но наблюдаемые точки должны обладать некоторыми свойствами[4]. Для их поиска используются специальные программы - детекторы углов, которые интерполируют функцию яркости изображения и позволяют определить максимум контрастности. Субпиксельные координаты изображения позволяют повысить дискретизацию в 10 раз при незначительном увеличении объема вычислений. На рисунке 5 изображен график зависимости погрешности от определяемой дистанции до точки с использованием субпиксельной обработки изображения.

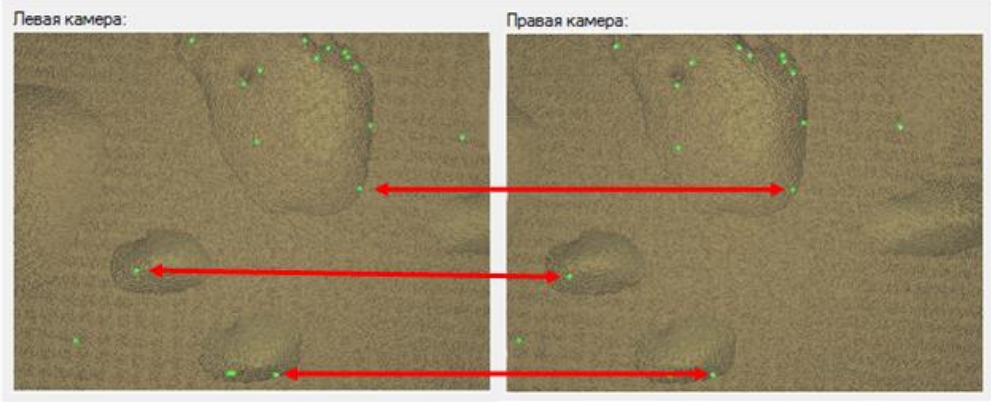


Рис. 3. Соответствующие точек.

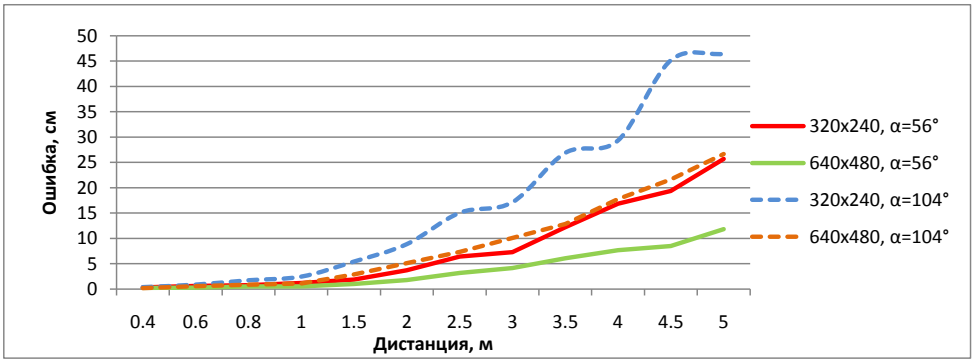


Рис. 4. Зависимость ошибки определения дистанции от параметров камер при обработке дискретной пиксельной решетки изображений.

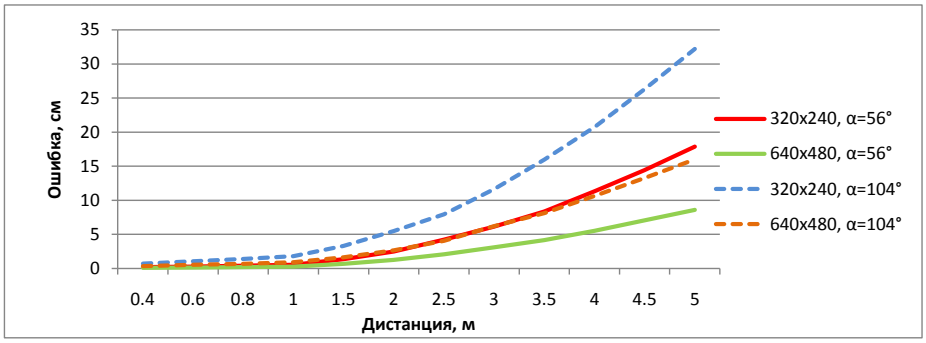


Рис. 5. Зависимость ошибки определения дистанции от параметров камер при использовании субпиксельной обработки изображений.

Заключение

В статье исследована погрешность триангуляционного метода расчета координат точки подводного дна в зависимости от значений ее проекций на двух видеокадрах.

Величина ошибки зависит от удаленности до подводного дна и разрешения камер. Влияющими параметрами являются также фокусное расстояние и угол обзора. Следует отметить, что многие камеры сейчас оснащены автофокусом. Величина угла обзора влияет на значение дистанции до объекта, на которой расчеты наиболее точны. Чем он меньше - тем на большем расстоянии мы можем использовать нашу СТЗ.

Результаты исследования продемонстрировали целесообразность использования субпиксельной обработки изображений, хотя это и повышает длительность обработки кадров.

Для дальнейшего совершенствования метода следует улучшать как аппаратную составляющую (разрешающую способность камер), так и программную (разработка новых способов шумоподавления, повышение дискретизации субпиксельной обработки, улучшение алгоритмов поиска соответствующих точек).

Полученные результаты исследования могут использоваться при проектировании систем видеонаблдения, предназначенных для СТЗ подводных аппаратов различного назначения, выполняющих работы вблизи дна.

Литература

1. Зубарь А.В., Майстренко В.А., Кайков К.В. Программно-аппаратная реализация оптико-электронной стереосистемы определения дальности. Омский научный вестник, 2013, вып. 3.
2. Сиек Ю.Л., Сакович С.Ю. Управление движением подводного робота по информации от системы технического зрения. Морские интеллектуальные технологии, 2012, вып. 1-1, с. 150-164.
3. Локтев Д. А., Алфимцев А. Н. Измерение расстояния до движущегося объекта с помощью комплексной системы видеомониторинга. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 11. URL: http://engjournal.ru/catalog/it/hidden/996.html
4. Gary Bradski, Adrian Kaehler Learning OpenCV. Sebastopol.:O'Reilly Media, Inc, 2008. – 571 p.
5. Сиек Ю.Л., Борисов А.Н., Сакович С.Ю. Программа моделирования подводной видеосъемки. РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2015616823 от 24.06.2015.

References

1. Zubar' A.V., Majstrenko V.A., Kajkov K.V. Programmno-apparatnaja realizacija optiko-jelektronnoj stereosistemy opredelenija dal'nosti. Omskij nauchnyj vestnik, 2013, vyp. 3.
2. Siek Ju.L., Sakovich S.Ju. Upravlenie dvizheniem podvodnogo robota po informacii ot sistemy tehnicheskogo zrenija. Morskie intellektual'nye tehnologii, 2012, vyp. 1-1, s. 150-164..
3. Loktev D. A., Alfimcev A. N. Izmerenie rasstojanija do dvizhushhegosja ob#ekta s pomoshh'ju kompleksnoj sistemy videomonitoringa. Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii, 2013, vyp. 11. URL: http://engjournal.ru/catalog/it/hidden/996.html.
4. Gary Bradski, Adrian Kaehler Learning OpenCV. Sebastopol.:O'Reilly Media, Inc, 2008. – 571 p.
5. Siek Ju.L., Borisov A.N., Sakovich S.Ju. Programma modelirovanija podvodnoj videos#emki. ROSPATENT. Svidetel'stvo №2015616823 ot 24.06.2015

УДК 621

МЕТОДЫ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Мин Хеин
Республика Союз Мьянмы
аспирант кафедры «Судовая автоматика и измерения», маг. техн. наук.
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008 г. Санкт-Петербруг, ул. Лоцманская д.3
тел.: +7 (900) 649-65-36; e-mail: hawgyi86@gmail.com

Аннотация

Объектом исследования в статье являются адаптивные системы автоматического управления с высоким уровнем искусственного интеллекта. Целью исследования является разработка подхода и методов применения адаптивных систем автоматического управления с высоким уровнем искусственного интеллекта для совершенствования сложных (нестационарных нелинейных) объектов морской инфраструктуры. Разработанный подход основан на создании одной из версий, ориентированной на особенности морских объектов, самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией (СОРЭ), предложенного акад. РФ Красовским А. А. Использование алгоритмов разработанной версии регулятора для синтеза систем управления нестационарными нелинейными объектами морской инфраструктуры позволяет обеспечивать их адаптацию при параметрических и структурных возмущениях, и, тем самым, повысить их эффективность. Приведён конкретный пример синтеза самоорганизующейся системы для судна как объекта управления его движением по курсу. Принципиальное отличие алгоритмического обеспечения этих систем управления от известных адаптивных систем состоит в том, что они построены на сочетании алгоритмов структурной (функциональной) адаптации с алгоритмами параметрической адаптации и оптимальностью.

Ключевые слова: адаптивные системы, искусственный интеллект, самоорганизующийся регулятор, сложные объекты морской инфраструктуры.

APPLICATION OF METHODS OF ADAPTIVE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM WITH HIGH LEVEL OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR THE IMPROVEMENT OF COMPLEX OBJECTS MARITIME INFRASTRUCTURE

Min Hein
The Republic of Union of Myanmar
Postgraduate, Department «Ship automation and measurement», Master Sci. Tech.,
State Marine Technical University of Saint-Petersburg
190008, Saint-Petersburg, Lotsmanskya Street, 3.
Tel.: +7 (900) 649-65-36; e-mail: hawgyi86@gmail.com

Abstract

The object of the research in the article presents the adaptive automatic control system with a high level of artificial intelligence. The aim of this study is to develop an approach and methods of application of adaptive automatic control systems with a high level of artificial intelligence to improve the complex (non-linear non-stationary) maritime infrastructure. The developed approach is based on the creation of one of the versions, particularly focused on offshore facilities, self-organizing optimum regulator with extrapolation (SORET), proposed by Acad. RU Krasovsky A. A. Using developed algorithms of regulator for the synthesis of control systems of transient nonlinear marine infrastructure objects allows to provide their adaptation under parametric and structural perturbations, and thus improve their performance. The above specific example show as synthesis of self-organizing system for the vessel as an object of control its movement at the rate. The principal difference between algorithmic supporting of control systems from well-known adaptive systems is that they are built on a combination of structural algorithms (functional) adaptation algorithms with parametric adaptation and optimality.

Key words: adaptive systems, artificial intelligence, self-organizing regulator, complex objects of maritime infrastructure.

1. Состояние проблемы

Проблема искусственного интеллекта искусственного интеллекта (ИИ) является одним из перспективных направлений современных компьютерных технологий. Методы ИИ открывают перспективы решения сложных и трудноформализуемых задач управления и принятия решений при эксплуатации новой техники, особенно в нестандартных и экстремальных ситуациях. Современный этап применения и развития ИИ в морских исследованиях и технологиях характеризуется интеграцией различных подходов, концепций и направлений, использующих в большинстве своём достижения нечёткой логики и нейроинформатики [1]. Вместе с тем имеющий формальный аппарат ИИ пока далёк от совершенства и имеет ограниченную практическую ценность. Наиболее активно развиваются методы ИИ на основе принципов нечеткой логики и с нейронным управлением. Для первых характерно реализуемое средствами нечеткой логики эвристическое построение стратегий управления с использованием экспертных знаний. Основой вторых служит искусственная нейронная сеть, которая способна обучаться и выбирать в различных условиях эксплуатации значения своих параметров, при которых она наилучшим образом справляется с поставленной задачей. Достоинством обоих видов систем является отсутствие необходимости для получения решения задачи точного описания динамики объекта управления.

Однако, из этого следует и их общий недостаток - невозможность аналитического исследования качества работы. К числу методов, которые построены на методах ИИ и формализованных аналитических принципах, следует отнести методы синтеза адаптивных систем управления (СУ) с самоорганизующими алгоритмами и обеспечивающими параметрическую и структурно-параметрическую адаптацию. Проблема адаптивных СУ до настоящего времени также, как и проблема ИИ в целом, относится к числу фундаментальных проблем, не получивших пока исчерпывающего решения, несмотря на полувековую историю развития и огромное число публикаций. По характеру изменений в управляющем устройстве адаптивные системы делятся, как известно, на две большие группы – самонастраивающиеся и самоорганизующиеся. В 1977г. в США была опубликована книга Дж. Саридиса «Самоорганизующиеся стохастические системы управления». Он предложил вместо термина «адаптивные системы» применять более широкий, но более конкретный термин «самоорганизующиеся системы с параметрической или функциональной (структурой) адаптацией», причём второй подкласс. В дальнейшем используются эти термины. В современных условиях актуальность создания адптивных, приспосабливающихся к условиям эксплуатации, самоорганизующихся систем управления - систем с высоким уровнем искусственного интеллекта сложными объектами морской инфраструктуры не только не уменьшается, но и возрастает.

2. Цель и задачи

Целью исследования является разработка подхода и методов применения адаптивных систем автоматического управления с высоким уровнем искусственного интеллекта для совершенствования сложных объектов морской инфраструктуры.

Для достижения поставленной цели были сформулированы задачи:
1. Выполнить анализ основных методов синтеза самоорганизующихся систем с универсальными алгоритмами.
2. Выявить особенности метода реализации универсальных алгоритмов в самоорганизующемся регуляторе с экстраполяцией (СОРЭ).
3. Привести алгоритмическое обеспечение СОРЭ.
4. Разработать подход, включающий алгоритмическое и програмное обеспечение СОРЭ, для создания систем управления сложными объектами морской инфраструктуры, реализующих их адаптацию при параметрических и структурных возмущениях.
5. Применить разработанный подход для создания нового типа адаптивной системы управления судном как объектом управления его движением по курсу, обеспечивающей адаптацию при параметрических и структурных возмущения.

3. Научная новизна

1. Предложен подход к построению более совершенных по сравнению с традиционными адаптивных систем управления сложными объектами морской инфраструктуры, обеспечивающих их адаптацию при параметрических и структурных возмущениях.

2. Разработано алгоритмическое обеспечение для принятой версии СОРЭ.
3. Разработана самоорганизующая система управления судном как объектом управления его движением по курсу, обеспечивающая её структурно-параметрическую адаптацию при наличии неопределённых возмущений.

4. Методы исследования

Адаптивные алгоритмы оптимального управления могут воплощать разные принципы адаптации и иметь разную структуру. Особой эффективностью отличаются алгоритмы, основанные на текущей идентификации контролируемого процесса. Текущая идентификация контролируемого процесса заключается в непрерывном определении параметров этого пороцесса на основе обработки его выходных и входных сигналов (величин). Алгоритмы, основанные на текущей идентификации, называют универсальными [3]. Универсальный алгоритм представляет собой комплекс вхзимосвязанных алгоритмов оценивания

(фильтрации), идентификации и собственно управления (регулирования). Между подсистемами оценивания (фильтрации), идентификации и собственно управления (регулирования) существует тесное взаимодействие, обмен информациией. Это и определяет высокую степень адаптивности комплекса. При наличии универсального комплекса алгоритмов, реализуемого в управляющей ЭВМ, и заданного набора датчиков и исполнительных устройств «проектирование» системы управления сводится к заданию структуры математической модели объекта (вместе с датчиками и исполнительными устройствами) и назначению критериев оптимизации. Всё остальное получается автоматически. Однако этот подход к созданию адаптивных систем предполагает наличие математической модели (ММ) объекта управления. Различные сложные технические объекты, как и объекты морской инфраструктуры (суда и корабли надводные и подводные, их технические средства и т.д.), в большинстве своём относятся к классу нестационарных нелинейных объектов. Исходя из особенностей нестационарных нелинейных объектов, связанных с трудностями разработки их математических моделей, требуется вариант с так называемым «безмодельным управлением».

В связи с этим весьма перспективным представляется подход к построению адаптивных систем управления на основе принципов самоорганизации, предложенный академиком РАН А. А. Красовский в 1994г. [2]. Этот подход основан на концепции разработки и применения самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией (СОРЭ). Адаптивные системы с этим регулятором также получили название самоорганизующихся систем управления с высоким уровнем искусственного интеллекта (по терминологии Дж. Саридиса). Структурная схема СОРЭ представлена на рис. 1. В этом классе регуляторов не нужно знать ММ объекта управления ни на стадии проектирования СУ ни после, при её эксплуатации. Сигнал рассогласования поступает на вход нескольких параллельно работающих циклических фильтров Калмана – Бьюси (ФКБ). Эти ФКБ различаются порядком и синтезированы для полиномиальных приближений сигнала рассогласования. На основе сравнения результатов работы ФКБ и сигнала рассогласования, осуществляется выбор порядка полиномиальной модели объекта управления. Переменные состояния выбранного ФКБ используются для формирования оптимального по квадратичному критерию управления. Порядок выбранного ФКБ изменяется с течением времени, за счет этого и происходит адаптация регулятора. Далее, при известном порядке полиномиальной модели на следующем цикле можно найти оптимальное управление. В этом и заключается адаптация и оптимизация сигнала управления и самого регулятора. Существуют ММ алгоритмов регулятора как с непрерывным временем функционирования, так и с дискретным. В данной работе применялись дискретные алгоритмы, т. к. они более удобны для реализации в микропроцессорной технике. Регулятор, структурная схема которого приведена на рис. 1, назван А. А. Красовским *самоорганизующимся,* так как *организация* его структуры и определение оптимальных параметров, необходимых для достижения цели управления, происходит *самостоятельно* (автоматически) в соответствии со структурой, порядком и параметрами неопределенного объекта.

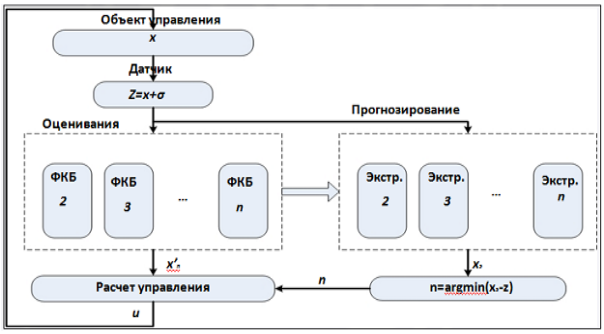


Рис.1. Структурная схема самоорганизующегося регулятора с высоким уровнем искусственного интеллекта, где ФКБ – блок фильтров Калмана – Бьюси, Экстр – блок экстраполяции, n=argmin(*x*.-*z*) –блок определения порядка модели, *x*-координаты объекта управления, *z* – сигнал с датчика, *u* –сигнал управления

Строгой теории автоматических контуров с СОРЭ пока не существует. Вся идеология СОРЭ и все его версии наиболее подробно и системно были опубликованы в известных трудах А. А. Красовского [4]. Однако каждая версия фактически является отдельным вариантом СОРЭ. Поэтому для конкретных объектов, требуется выбор соответствующей версии и её настройка. Алгоритм функционирования регулятора (в плане формирования управления) может создаваться для каждого конкретного случая разработчиком. В связи с этим было принята версия СОРЭ для реализации со следующим алгоритмическим обеспечением, имеющим обобщенные ФКБ и адаптацию времени экстраполяции. Рассматривается задача управления скалярным объектом (один вход – один выход), свойства которого неизвестны. Наблюдается разность x_1 между текущим значением $x_{тек}$ и заданным значением $x_{зад}$ выходного сигнала объекта. Основной контур управлениия состоит из объекта управления, наблюдателя в виде ФКБ разных порядков с порядком $n = \overline{2, n_m}$, модуля управления, оптимального по критерию обобщенной работы, и органа управления. Под управлением u понимается скорость перемещения управляющего органа ($u = \dot{y}$). Непрерывное время разбивается на циклы длительностью $t_ц$. На малом интервале

$t_ц$ выходной сигнал практически любого объекта может быть представлен в виде выходной величина последовательного соединения интегрирующих звеньев:

$$\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = x_3, ..., \dot{x}_{n-1} = x_n, \dot{x}_n = 0 \quad (1)$$

точками обозначены производные по времени. При таком представлении свободного изменения x_1 в течение цикла подразумевается, что $x_n = y, \dot{x}_n = u$. Таким образом, x_1 приближенно описывается полиномом $(n-1)$-й степени:

$$x_1(\theta) = x_1(0) + x_2(0)\theta + x_n(0)\frac{1}{(n-1)!}\theta^{n-1} \quad (2)$$

Где θ – внутреннее время цикла, $\theta[0, t_ц]$. Погрешности такого представления описываются белым шумом $\eta(\theta)$ с дисперсией σ, а измеряемый сигнал считается состоящим из шума $\eta(\theta)$ и выходного сигнала цепочк σ_δ^2 и интеграторов:

$$z_1 = x_1 + \eta(\theta) \quad (3)$$

Переход к дискретному времени выражается в разбиении цикла на целое число q шагов с шагом $\Delta t_ш$, изменяемых по длительности вместе с изменением $t_ц$:

$$t = \nu t_ц + \mu\Delta t_ш, \theta = \mu\Delta t_ш,$$

где $\nu = 1, 2$ – номер цикла, $\mu = 0, ..., q-1$ – номер шага в цикле.

Отличительной особенностью рассматриваемого алгоритма служит автоматический выбор порядка модели оцениваемого процесса на каждом цикле. Степень адекватности принятой модели по отношению к фактическому процессу обычно определяет качество, точность оптимального управления. Поэтому выбор порядка модели в процессе функционирования контура регулирования можно рассматривать как процедуру распознавания. Для распознавания порядка полиномиальной модели используется невязка между экстраполированным (предсказанным) значением сигнала рассогласования в конце следующего цикла и фактически измеренным значением этого сигнала в тот же момент времени.

Сигнал z_1 на каждом шаге обрабатывается набором ФКБ порядка $n = \overline{2, n_m}$. Каждый фильтр проводит идентификацию процесса x_1 в классе полиномиальных моделей $(n-1)$-го порядка вида (1), т.е. выдает оценки производных процесса x_1 до $(n-1)$-го порядка включительно.

В векторной форме (1) выглядит следующим образом:

$$\dot{x} = Ax \quad (4)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & 1 & ... & 0 \\ ... & ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & 0 & ... & 1 \\ 0 & 0 & 0 & ... & 0 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ ... \\ x_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

Выражение (3) в векторной форме:

$$z_1 = Hx_1 + \eta(\theta) \quad (6)$$

где $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & ... & 0 \end{bmatrix}$

Модель (4)-(6) не содержит неизвестных или приближенно известных параметров и является в этом отношении универсальной. Однако по отношению к реальным процессам такие модели сохраняют достаточную степень адекватности лишь в течение короткого времени. Отсюда потребность в автоматической смене порядка модели в ходе процесса управления реальном времени и соответствующей адаптации структуры наблюдателя.

Для модели (4)-(6) в предположении, что $\eta(\theta)$ можно считать практически белым шумом со спектральной плотностью мощности $R_д = 2\sigma_д^2\tau_д\sigma_д^2$ – дисперсияя шума, $\tau_д$ – малое время корреляции), непрерывный ФКБ имеет вид:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + PH^T R_д^{-1}(z - H\hat{x}) \setminus \quad (7)$$

$$\dot{P} = AP + PA^T - PH^T R_д^{-1} HP \quad (8)$$

здесь $\hat{x} = x(\theta)$ - оценка вектора состояния $x(\theta)$, $P = P(\theta)$ - ковариационная матрица.

После выбора порядка ФКБ производится экстраполяция или прогнозирование изменения x_1 на интервал $\theta_{эк}$ по формуле:

$$\hat{\dot{x}}(\theta_{эк}) = \hat{x}_1[\nu, 0] + \hat{x}_2[\nu, 0]\theta_{эк} + ... + \frac{\hat{x}_{nэ}[\nu, 0]}{(n_0 - 1)!}\theta_{эк}^{n_0 - 1} \quad (9)$$

где $\hat{x}[\nu, 0]$ - оценки, к началу ν-го цикла полученные от ФКБ порядка n_0, $i = \overline{1, n_0}$.

Исполнительная часть адаптивного регулятора имеет алгоритм, синтезированный на основе функционала обобщенной работы (ФОР). Это предполагает постоянство управления в течение цикла. Поэтому на выходе адаптивного регулятора устанавливается экстраполятор нулевого порядка, обеспечивающий кусочно-постоянную экстраполяцию.

Для непрерывного на каждом цикле варианта главная часть квадратичного ФОР имеет вид:

$$I_r = \hat{x}_1^2(\theta_э) + \beta_1 \int_0^{\theta_э} \hat{x}_1^2(\theta) d\theta$$

β_1 - заданный весовой коэффициент.

В аналитическом виде оптимальное управление на очередной цикл имеет вид:

$$u = -k_1 \frac{\partial I_r}{\partial \hat{x}_{n-1}(0)} = -\frac{2k_1\theta_{эк}^{n-1}}{(n-1)!} \cdot$$

$$\cdot\left[(1+\frac{\beta_1\theta_{эк}}{n})\hat{x}_1(-0) + (1+\frac{\beta_1\theta_{эк}}{n+1})\hat{x}_2(-0)\theta_{эк} \quad (10)\right.$$

$$\left. +...+(1+\frac{\beta_1\theta_{эк}}{2n-1})\frac{\hat{x}_n(-0)}{(n-1)!}\theta_{эк}^{n-1}\right]$$

где k_1 - коэффициент, обратный по отношению в квадратичных «затратах на управление» полного ФОР.

Для цели автоматического определения длительности цикла вычисляются средние значения квадратов оценок для ряда циклов, при этом принимается что смена порядка наблюдателя происходит одновременно с изменением длительности цикла, и это длительность цикла вычисляется по формуле:

$$t_ц^n = \frac{n!\sigma_{пэ}}{\sqrt{(x_1^{(n)})^2}}$$

где $\sigma_{пэ}$ - допустимая ошибка экстраполяции стационарного случайного процесса посредством полинома n -й степени.

Разработка конкретного регулятора предполагает не только создание универсального комплекса алгоритмов самоорганизующегося управления (регулирования), но и его также программно-аппаратного обеспечения, так как от этого зависит надежность и качество работы регулятора. СОРЭ промышленностью пока не выпускается. В связи с этим было разработано программное обеспечение и выполнена экспериментальная проверка работоспособности и эффективности адаптивной на принципах самоорганизации системы автоматического управления[5-7].

5. Результаты исследования

В качестве примера рассмотрим применение разработанного подхода для построения самоорганизующей системы управления судном как объектом его движения по курсу (авторулевого). Судно относят к сложным объектам управления в связи с тем, что при изменении скорости хода или загрузки (осадки) происходит изменение значений его гидродинамических коэффициентов. Причём зависимость этих коэффициентов от скорости судна и его загрузки нелинейная. Следствием этого судно как объект управления движением его по курсу является сложным нестационарным и нелинейным объектом. Для определения особенностей оптимального самоорганизующегося авторулевого и авторулевого с ПИ-законом было выполнено имитационное моделирование их работы применительно к судну с водоизмещением 6000т. Коэффициенты математической модели судна были определены экспериментально для трёх режимов – 1) скорость 10,7 узлов, порожний; 2) скорость 9,5 узлов, с грузом; 3) скорость 5 узлов, с грузом [8]. Постоянные времени математической модели судна для этих режимов соответственно следующие: 12с., 22с.,57с. Рассматривались два варианта синтеза систем - с традиционным ПИ-регулятором и самоорганизующимся регулятором при учёт различных параметрических и структурных возмущений. В качестве параметрических возмущений рассматривались изменения постоянной времени судна при трёх режимах движения, а структурных возмущений – отсутствие обратной связи рулевого привода, рисунки 2 и 3 .

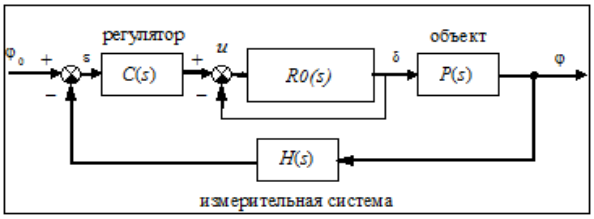


Рис. 2. Структурная схема системы стабилизации судна на курсе с ПИ- законом управления и отрицательной обратной связью рулевого привода, где P(s), H(s), C(s) и Ro(S) передаточные функции соответственно объекта , измерительного комплекса, регулятора и исполнительного механизма (рулевого привода).

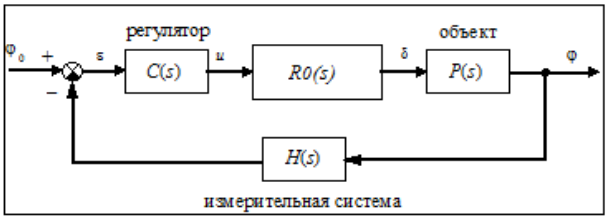


*Рис. 3.*Структурная схема системы стабилизации судна на курсе с ПИ- законом управления и отсутствием отрицательной обратной связи рулевого привода, где P(s), H(s), C(s) и Ro(S) передаточные функции соответственно объекта, измерительного комплекса, регулятора и исполнительного механизма (рулевого привода).

На рисунке 4 представлены графики переходных процессов в системах для режимов с параметрическими возмущениями – изменением постоянной времени судна, на рис.5 с структурно-парамерическими возмущениями – отсутствием обратной связи рулевого привода и изменением постоянной времени судна.

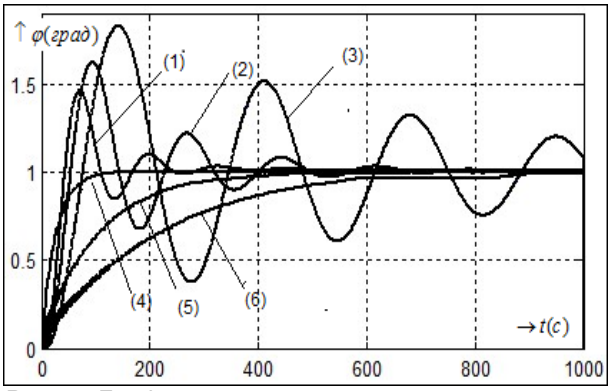


Рис. 4. Графики переходных процессов в системах управления с ПИ-регулятором и СОРЭ-регулятором при изменении постоянной времени судна, где (1),(2),(3) – кривые переходного процесса в системе с ПИ-регулятором соответственно при постоянной времени судна 12с., 22с.,57с., (4),(5),(6). - кривые переходного процесса в системе с СОРЭ-регулятором также соотвественно при указанных постоянных времени (параметрическая адаптация).

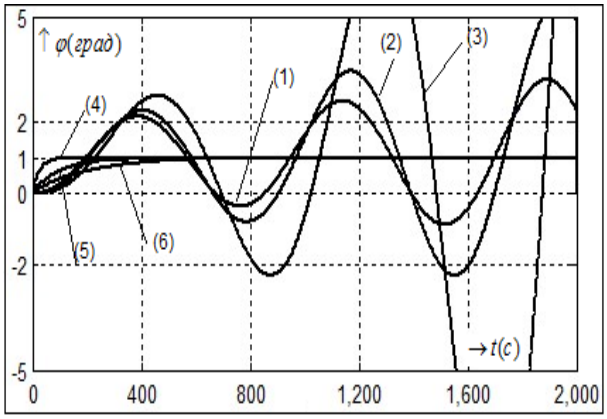


Рис. 5. Графики переходных процессов в системах управления с ПИ-регулятором и СОРЭ-регулятором при отсутствии обратной связи и изменении постоянной времени, где (1),(2),(3) – кривые переходного процесса в системе с ПИ-регулятором соответственно при постоянной времени судна 12с., 22с.,57с., (4),(5),(6). - кривые переходного процесса в системе с СОРЭ-регулятором также соотвественно при указанных постоянных времени (структурно-параметрическая адаптация).

Из вида графиков следует, что при наличии параметрических и структурных возмущений система с ПИ-регулятором становится не работоспособной, а система с СОРЭ – обеспечивает требуемые показатели качества регулирования. Результаты моделирования показывают потенциальные возможности самоорганизующегося авторулевого, что позволяет его считать адаптивным авторулевым нового поколения. Самоорганизующиеся авторулевые могут поставляться как на новые суда, так и модернизируемые. Для модернизируемых авторулевых, программируемые контроллеры которых реализуют традиционные законы управления, требуется изменение в основном только программного обеспечения. Внедрение самоорганизующихся авторулевых обеспечивает значительное улучшение технико-экономических характеристик строящихся и модернизируемых судов.

Выводы

В результате исследований разработан подход к применению адаптивных систем автоматического управления с высоким уровнем искусственного интеллекта (самоорганизующихся систем – по терминологии Дж Саридиса) для совершенствования сложных объектов морской инфраструктуры. Он основан на создании одной из версий, ориентированной на особенности морских объектов, самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией (СОРЭ, *)*, предложенного акад. РФ Красовским А. А., включая его алгоритмическое и программно-аппаратное обеспечение. Использование алгоритмов разработанной версии регулятора для синтеза систем управления нестационарными нелинейными объектами морской инфраструктуры позволяет реализовывать их адаптацию при параметрических и структурных возмущениях, и тем самым повысить их эффективность. Принципиальное отличие алгоритмического обеспечения этих систем управления от известных адаптивных систем состоит в том, что они построены на сочетании алгоритмов структурной (функциональной) адаптации с алгоритмами параметрической адаптации и оптимальностью. Результаты моделирования показывают большие потенциальные возможности адаптивных систем управления сложными объектами морской инфраструктуры, построенных на основе принципов самоорганизации. Они позволяют снизить требования к точности математического описания управляемых процессов, упростить процесс проектирования систем управления, уменьшить сроки наладки и испытаний, снизить требования к допускам на некоторую часть аппаратуры, сократить номенклатуру средств автоматизации.

Литература

1. Александров В.Л., Матлах А.П., Нечаев Ю.И., Поляков В.И., Ростовцев Д.М. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технолгиях.Под общей ред. д.т.н. проф. Нечаева Ю.И. С-Пб.: 2001.
2. Красовский А.А. Адаптивный оптимальный регулятор с переменным порядком наблюдателя и временем экстраполяции. // АиТ. 1994, №11. с. 97-112.
3. Красовский А.А., Буков В.Н., Шендрик В.С. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами. Изд. Наука, 1977.
4.Красовский А.А. Избранные труды: Самые ранние – самые новые. Изд. Наука, 2003.
5. Туркин И.И., Быков Э.Б. Самоорганизующиеся системы управления сложных технических объектов.// Индустрия. №1.2005.С.2-3.
6. Туркин И.И. Самоорганизующиеся системы управления сложными судовыми техническими средствами. // Морские интеллектуальные технологии, №1. 2008. с. 66-68.
7. Туркин И.И. Кирюхин С.Н. Экспериментальная проверка работоспособности и эффективности адаптивной на принципах самоорганизации системы автоматического управления. 23-я Межвузовская научно-техническая конференция. ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» на базе Военно-морского института радиоэлектроники им. А.С. Попова (филиал ВУНЦ ВМФ «ВМА», г. Петродворец). – СПб: 2012. Часть 3,стр.209-215.
8. Тетюев Б.А., Березин С.Я. Системы автоматического управления движением судна по курсу. - Л.: Судостроение, 1990.

References

1. Alexandrov V.L., Mutley A.P., Nechaev Yu.I., Polyakov V.I., Rostovtsev D.M. Intelligent systems in marine research and tehnolgiyah.Pod general ed. Dr prof. Nechaev Y.I. Saint-Petersburg.: 2001.
2. Krasovsky A.A. Adaptive optimal control with variable order of the observer and the extrapolation of the time. // Automat. 1994, №11. from. 97-112.
3. Krasovsky A.A., Bukov V.N., V.S. Shendrik. Universal algorithms for optimal continuous process control. Ed. Science, 1977.
4. Krasovsky A.A. Selected Works: The oldest - newest. Ed. Science, 2003.
5. Turkin I.I., Bukov E.B. Self-organizing management of complex technical objects.// industry. №1.2005.C.2-3.
6. Turkin I.I. Self-organizing complex ship's technical facilities management. // Marine intelligent technology, №1. 2008. p. 66-68.
7. Turkin I.I., Kiryuhin S.N. Experimental verification of the efficiency and effectiveness of the principles of adaptive automatic control system of self-organization. 23th Inter-College Scientific Conference. VUNTS Navy "Naval Academy" at the Naval Radio Electronics Institute. A.S. Popova (Branch VUNTS Navy "BMA" Petrodvorets). - St. Petersburg: 2012. Part 3, pg.209-215.
8. Tetyuev B.A., S.Y. Berezin. Automatic control systems for the movement of the rate of the vessel. - L .: Shipbuilding, 1990.

Численные методы и комплексы программ

УДК 621.224 (043)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО МЕТОДА КОНЕЧНЫХ И ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ГИДРОТУРБИНЫ

Золотаревич Валерий Павлович
кандидат технических наук,
доцент кафедры информационно-навигационных систем,
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики
197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49
e-mail: zolotarevich@yandex.ru

Салиенко Александр Евгеньевич
заместитель директора бизнес-единицы по ГТО – директор по науке и исследованиям,
Акционерное общество «Тяжмаш»
446010, г. Сызрань, ул. Гидротурбинная, д.13

Фрумен Александр Исаакович
кандидат технических наук, профессор
ученый секретарь совета Санкт–Петербургского государственного морского технического университета,
профессор кафедры строительной механики корабля,
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

Югов Николай Васильевич
доктор технических наук, профессор
начальник отдела информационных, цифровых и компьютерных инженерных технологий,
ООО «ТГР Инжиниринг»
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10/14

Аннотация

На основе применения совместного метода конечных и граничных элементов выполнено исследование резонансных частот двух вариантов исполнения рабочего колеса гидротурбины. С этой целью предварительно выполнено построение математической модели колеса в циклосимметричной постановке. Расчеты напряженно-деформированного состояния колеса показали, что утолщение задней кромки приводит к снижению эквивалентных напряжений. Исследования показали, что утолщение выходной кромки лопасти рабочего колеса практически не влияет на значения собственных частот колебаний. Выполнен анализ резонансных частот рабочего колеса и спектра частот возмущающих сил.

Полученные результаты показали совпадение значений первых основных двух собственных частот лопасти как в математической модели для изолированной лопасти в воде, так и в составе всего колеса в воде. Выявлены новые физические эффекты взаимодействия лопасти с «легкими» и «тяжелыми» акустическими средами.

Ключевые слова: Рабочее колесо, радиально-осевая гидротурбина, собственные частоты и формы, метод конечных элементов, метод граничных элементов, вибрации, резонансная частота, вычислительная гидродинамика.

USE OF COUPLED BOUNDARY AND FINITE ELEMENTS METHOD FOR ANALISYS OF RESONANCE FREQUENCIES OF RUNNER OF HYDROTURBINE

Valerii P. Zolotarevich
PhD, Department of Information and Navigation Systems,
ITMO UNIVERSITY (SAINT PETERSBURG NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS)
49 Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russia
e-mail: zolotarevich@yandex.ru

Alexandr E. Salienko
Research and Development Director,
JSC “TYAZHMASH”
13 Hydroturbinnaya St., Syzran, Samara region, Russia, 446010

Alexandr I. Frumen
Professor, PhD
Department of structural mechanics of ships,
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation

Nicolai V. Yugov
Professor, Dr. Sci. Tech.,
head of Department of information, digital and computer engineering technology,
LLC "TGR-Engineering"
Lotsmanskaya, 10/14, St. Petersburg 190008, Russian Federation

Abstract

The coupled finite and boundary elements method used to study the resonant frequencies of the two variants construction of the runner hydraulic turbine. For this purpose was construct the mathematical model of the runner in cyclosymmetry statement. Calculation of stress-strain state of the runner showed that the thickening of the trailing edge reduces the equivalent stresses. Studies have shown that thickening of the trailing edge of the runner blade has almost no effect on the values of the natural frequencies. The analysis of the resonant frequency of the runner and the frequency spectrum of the excitation forces achieved.

The results showed that values first and second natural frequency isolated blade in water matched with the natural frequency full runner. New physical effects of the interaction of the blade with the "light" and "heavy" acoustic environments found.

Key words Francis turbine, natural frequencies and mode shapes, finite element method, boundary element method, vibration, resonance frequency, computational fluid dynamics.

Введение

Расчеты параметров собственных колебаний рабочих колес турбин в воде в отличие от расчетов изолированных лопастей требуют принципиально новых решений в области сеточных разбиений рабочего колеса в целом по сравнению с сеточными разбиениями изолированных лопастей, а также применения упрощения отдельных конструктивных элементов исходя из принципа искусство возможного. Это обусловлено большим количеством степеней свободы моделей, наличия серверов с большим объемом оперативной и дисковой памяти, а также необходимой величиной быстродействия многопроцессорных модулей, имеющих большое количество вычислительных ядер. Также должны быть обеспечены оптимальные соотношения сеток «сухой» конструкции (с помощью которых формируется базис собственных векторов) с более грубыми сетками «смоченной» конструкции при их совмещении. В таком подходе авторы данной работы попытались решить эту трудоемкую проблему. Упрощенные подходы, изложенные в предыдущей работе [1], не всегда позволяют получить достоверную информацию о значениях собственных частот рабочего колеса в воде на основе исследования собственных частот изолированной лопасти в воде. Однако такой этап необходим для понимания физического характера взаимодействия сложной поверхности лопасти с тяжелой акустической средой, которой является вода. Все исследования выполнялись на основе совместного метода конечных и граничных элементов [2-6] .

1. Расчет напряженно-деформированного состояния рабочего колеса

Расчет напряженно-деформированного состояния был выполнен в циклосимметричной постановке. Сеточное разбиение 1/14 части рабочего колеса (РК) приведено на рис. 1.

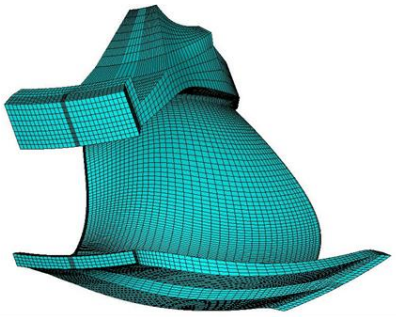


Рис. 1. Сеточное разбиение 1/14 рабочего колеса для расчета напряженно-деформированного состояния РК в циклосимметричной постановке

Рассматривались два варианта рабочего колеса, которые отличались толщиной выходной кромки РК около обода (см. рис. 2). В дальнейшем, вариант РК с тонкой выходной кромкой бу-

дем обозначать вариант 1, а с утолщенной кромкой — вариант 2.

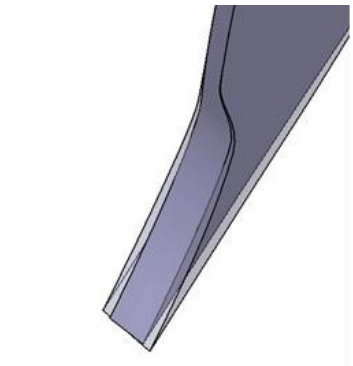


Рис. 2. Два варианта толщины задней кромки РК в районе обода

Закрепления модели были заданы на верхней поверхности ступицы РК. Для степеней свободы соответствующих узлов, лежащих на поверхностях периодичности, были определены условия циклосимметрии. На поверхности лопасти РК, а также на поверхностях ступицы и обода задавались значения гидродинамических давлений, полученных в результате расчета течений в проточной части турбины, также учитывались инерционные нагрузки связанные с полем силы тяжести и вращением рабочего колеса. Расчетная сетка состояла из 64890 узлов и 52273 восьмиузловых гексагональных элементов.

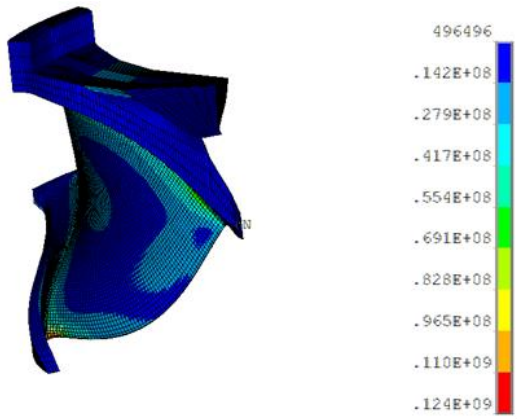


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений (Па) для второго варианта лопасти

На рис. 3 показано распределение напряжений для второго варианта лопасти. Из рисунка видно, что максимальные напряжения наблюдаются на задней кромке рабочего колесо в районе обода. Расчеты показали, что утолщение задней кромки рабочего колеса вблизи обода приводит к уменьшению максимальных напряжений со 146 МПа для первого варианта лопасти до 124 МПа для второго варианта лопасти.

2. Расчет собственных частот лопасти рабочего колеса

Для двух вариантов лопасти рабочего колеса были рассчитаны собственные частоты при условии жесткой заделки в местах крепления к ступице и к ободу. Расчетная сетка для обоих вариантов лопасти состояла из 92400 узлов и 19044 гексагональных квадратичных элементов (рис. 4).

Ниже в табл. 1 и 2 приведены результаты расчета первых двадцати собственных частот в «воздухе» и в «воде» для двух вариантов лопасти.

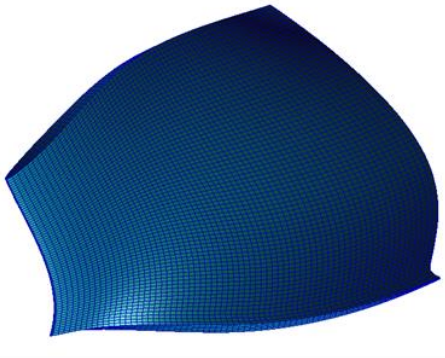


Рис. 4. Сеточное разбиение лопасти рабочего колеса

Таблица 1

Собственные частоты колебаний для первого варианта лопасти

№	Частота в «воздухе», Гц	Частот в «воде», Гц	Отношение
1.	685,9	349,2	0,51
2.	739,6	431,5	0,58
3.	970,5	611,9	0,63
4.	1202,7	719,3	0,60
5	1284,0	859,1	0,67
6	1335,2	870,4	0,65
7	1635,7	1115,3	0,68
8	1666,5	1167,0	0,70
9	1732,5	1232,2	0,71
10	1816,5	1265,5	0,70
11	1853,1	1392,4	0,75
12	2067,4	1474,9	0,71
13	2275,9	1675,3	0,74
14	2336,1	1766,8	0,76
15	2385,8	1804,1	0,76
16	2528,1	1893,4	0,75
17	2617,5	1954,8	0,75
18	2848,2	2240,2	0,79
19	2999,6	2350,7	0,78
20	3027,5	2401,9	0,79

Таблица 2

Собственные частоты колебаний для второго варианта лопасти

№	Частота в «воздухе», Гц	Частот в «воде», Гц	Отношение
1.	688,4	355,0	0,52
2.	755,8	446,2	0,59
3.	981,6	623,9	0,64
4.	1207,5	722,4	0,60
5	1296,2	868,5	0,67
6	1344,4	882,9	0,66
7	1639,5	1127,8	0,69
8	1674,0	1170,2	0,70
9	1747,0	1235,0	0,71
10	1819,6	1277,1	0,70
11	1855,5	1394,5	0,75
12	2088,8	1498,1	0,72
13	2281,3	1679,7	0,74
14	2343,7	1772,2	0,76
15	2387,9	1809,7	0,76
16	2529,4	1908,2	0,75
17	2651,3	1977,7	0,75
18	2848,3	2243,0	0,79
19	2998,5	2357,7	0,79
20	3036,0	2405,5	0,79

Из табл. 1 и 2 видно, что изменение толщины задней кромки вблизи обода слабо влияет на собственные частоты лопасти. На рис. 5 приведены формы первых шести колебаний лопасти.

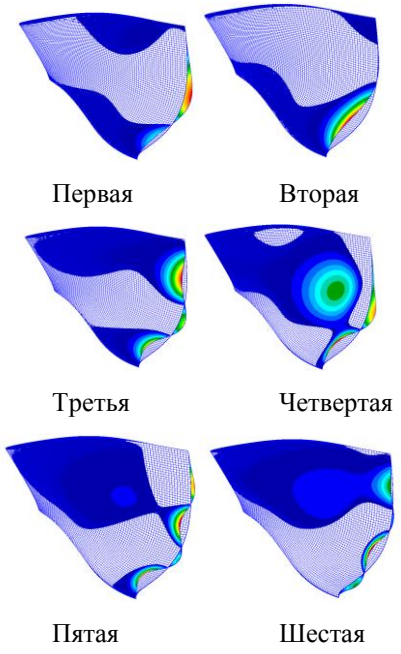


Рис. 5. Первые шесть форм колебаний лопасти

3. Расчет собственных частот рабочего колеса

Как показали расчеты из предыдущего раздела, толщина задней кромки мало влияет на значения собственных частот лопасти. Поэтому в этом разделе приведены результаты расчетов собственных частот всего рабочего колеса только для первого варианта конструкции.

Следует отметить, что с точки зрения отстройки собственной частоты первой моды лопастей колебаний колеса (на примере расчетов и сопоставления собственных частот в воде изолированной лопасти и колеса в целом) от второй оборотной лопаточной частоты возмущения второй вариант колеса с утолщенной задней кромкой лопасти в районе обода является более предпочтительным.

Для расчета собственных частота сухой конструкции была использована конечно-элементная сетка из восьми узловых гексагональных элементов. Сетка была построена на основе циклосимметричной модели и состояла из 893130 узлов и 731808 элементов. Сетка рабочего колеса показана на рис. 6. В табл. 3. приведены результаты расчета собственных частот рабочего колеса в «воздухе».

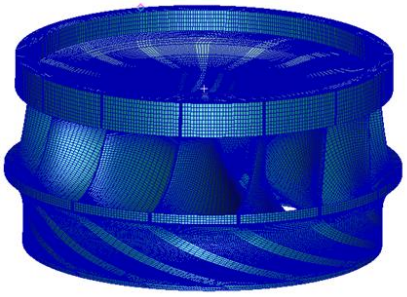


Рис. 6. Конечно-элементная модель рабочего колеса

Таблица 3

Собственные частоты колебаний рабочего колеса в «воздухе»

№	Частота , Гц	Описание
1.	210,2	Крутильные колебания
2.	321,9	Обод по моде m = 1
3.	321,9	Обод по моде m = 1
4.	403,2	Обод по моде m = 2
5	403,2	Обод по моде m = 2
6	512,8	Обод по моде m = 3
7	512,8	Обод по моде m = 3
8	564,1	
9	564,1	
10	588,6	
11	588,6	
12	601,9	
13	601,9	
14	606,3	Первая лопастная
15	641,1	Вторая лопастная
16	645,5	
17	645,5	
18	677,4	
19	677,4	
20	693,5	Третья лопастная

Для расчета собственных частот в воде была построена сетка смоченной поверхности, которая состояла из 39452 узлов и 39532 элементов. Сет Для расчета собственных частот в воде была построена сетка смоченной поверхности, которая состояла из 39452 узлов и 39532 элементов. Сетка смоченной поверхности рабочего колеса показана на рис. 7.

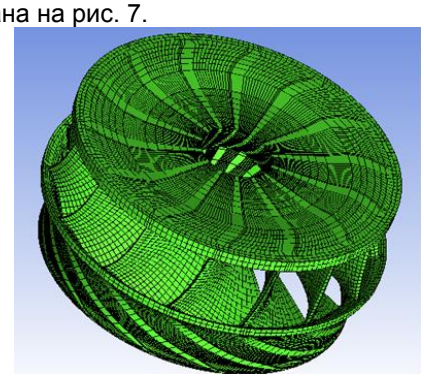


Рис. 7. Сетка смоченной поверхности рабочего колеса

В качестве базиса для расчета собственных частот и собственных мод рабочего колеса в «воде» использовались первые тридцать частот и мод «сухой» конструкции. Другими словами моды для более густой сетки «сухой» конструкции лопасти накладывались на разряженную сетку смоченной поверхности лопасти. Окончательные расчеты проводились для 5 точек интегрирования по элементу. Использование в качестве базиса 20 мод, а также числа точек интегрирования, равного 2 дают с точки зрения физики колебаний неудовлетворительные результаты. Результаты расчета первых двадцати собственных частот рабочего колеса в воде приведены в табл. 4.

Таблица 4

Собственные частоты рабочего колеса в «воде»

№	Частота в «воздухе», Гц	Частот в «воде», Гц	Отношение
1.	210,2	187,8	0,89
2.	321,9	269,8	0,84
3.	321,9	269,8	0,84
4.	403,2	302,9	0,75
5	403,2	302,9	0,75
6	512,8	335,6	0,65
7	512,8	335,6	0,65
8	564,1	341,6	0,61
9	564,1	341,6	0,61
10	588,6	343,9	0,58
11	588,6	343,9	0,58
12	601,9	345,1	0,57
13	601,9	345,1	0,57
14	606,3	352,2	0,58
15	641,1	455,6	0,71
16	645,5	452,5	0,70
17	645,5	452,5	0,70
18	677,4	486,7	0,72
19	677,4	486,7	0,72
20	693,5	550,8	0,79

Частоты дискретных составляющих возмущающих динамических сил приведены в табл. 5.

Таблица 5

Частоты основных дискретных составляющих динамических сил, действующих на рабочее колесо

№	Частота , Гц	Описание
1.	8,3 Гц	Часто вращения вала турбины (оборотная)
2.	116,6 ГЦ	Первая оборотно-лопастная частота
3.	233,3 Гц	Вторая оборотно-лопастная частота
4.	166 Гц	Первая оборотно-лопаточная частота
5	332 Гц	Вторая оборотно-лопаточная частота

В данной работе основное внимание было уделено сравнительным расчетам изолированной лопасти и колеса в целом в «воде», что не удалось выполнить в работе [1] в силу отсутствия необходимой вычислительной мощности компьютеров.

Заключение

Полученные результаты показали удовлетворительное совпадение значений первых основных двух собственных частот лопасти как в математической модели для изолированной лопасти в воде, так и в составе всего колеса в воде (см. табл. 1 и 4). Более того снялись научные сомнения в физике колебаний при взаимодействии поверхности лопасти и водяной среды, которая относится к тяжелым акустическим средам, где по сравнению с легкими акустическими средами (к которым относится, в частности, и воздух) наблюдаются совершенно новые физические эффекты, отсутствующие в исследованиях зарубежных авторов [8]. Так, например, подтвержден тот непреложный факт, что для первой моды собственных колебаний основным физическим процессом является процесс воздействия лопасти на воду по терминологии одного из основоположников акустики Лэмба: «сила в воду», как процесс «поршневого» воздействия лопасти на воду (см. табл. 1 и 4, где коэффициент фактора влияния воды на значения собственных частот для модели изолированной лопасти и лопасти в составе колеса равны соответственно 0,51 и 0,58). Для второй моды колебаний частично вступают в силу процессы перетекания среды вдоль лопасти, что сказывается и на коэффициенте фактора влияния воды в сторону его снижения (численное значение коэффициента при этом увеличивается, т.к. берется отношение частот в воде к частотам в воздухе). Так, эти коэффициенты соответственно для второй моды колебаний (см табл. 1 и 4) равны 0,58 для изолированной лопасти и 0,71 для лопасти колеса в целом.

Сравнение собственных частот рабочего колеса в воде и спектра возмущающих сил показывает, что основные частоты возмущающих сил

лежат ниже собственных частот лопасти в воде, как в варианте изолированной лопасти, так и колеса в целом. Исключение составляет вторая оборотно-лопаточная частота возмущения 332 Гц, которая близка к первой лопастной рабочего колеса в воде (352 Гц), но условно считается на отстроенной, т.к. во-первых, критерий отстройки в 30% предназначен для более низкочастотного диапазона и во-вторых, вторая лопастная собственная частота по сравнению с первой менее энергочувствительна к воздействиям. Что касается низших частот лопастей совместно с ободом (см. табл.4), то для их раскачки требуются большие энергоресурсы в неоднородностях гидродинамического потока и они менее критичны к возмущениям. Однако, требуется вести тщательный журнал учета режимов работы турбины и периодические замеры вибрации и спектральный анализ колебаний вала на подшипнике в натурном варианте для поиска новых инженерных решения для будущих прототипов турбин. Для достижения всех требований в части отстройки частот требуются модельные экспериментальные исследования, как показано в работе [7]

Литература

1. Золотаревич В.П., Салиенко А.Е., Фрумен А.И., Югов Н.В. Исследование собственных частот и форм колебаний лопасти рабочего колеса радиально-осевой гидротурбинына основе применения совместного метода конечных и граничных элементов. Морские интеллектуальные технологии., №2(32), Санкт-Петербург, 2016.
2. Югов Н.В. Применение методов конечных и граничных элементов к исследованиям динамических и акустических характеристик транспортных средств и инженерных сооружений. Доклад на XVII Международной конференции “Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов”. Санкт-Петербург. 1999, с 305-308.
3. Симин Н.О., Тисленко И.Н., Югов Н.В. Численный анализ звукоизлучения замкнутых оболочек методом конечных и граничных элементов вблизи характеристических частот. Труды второй международной конференции по судостроению. Санкт-Петербург, 1998, с. 213-220.
4. Югов Н.В., Симин Н.О. Программный комплекс по расчету акустических полей корпусов судов. Труды второй международной конференции по судостроению. Санкт-Петербург, 1998, с. 124-129.
5. Югов Н.В. Компьютерная система акустического проектирования транспортных средств и инженерных сооружений. Доклад на XXIV конференции Ассоциации Автомобильных инженеров “Проблемы качества и сертификации транспортных средств”. г. Дмитров Московской обл. 1998, с. 179-184.
6. Югов Н.В., Минин Р.А., Золотаревич В.П. Определение характеристик распределения гидроакустических полей судов методом граничных и конечных элементов. Доклад на XVIII Международной конференции “Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов”, Санкт-Петербург, 2000, с. 123-128.
7. B. Graf, L. Chen. Correlation of Acoustic Fluid-Structural Interaction Method for Modal Analysis with Experimental Results of a Hydraulic Prototype Turbine Runner in Water. Proceedings of ISMA, 2010.
8. Stefan Lais, Quanwei Liang, Urs Henggeler, Thomas Weiss, Xavier Escaler ,Eduard Egusquiza. Dynamic Analysis of Francis Runners – Experiment and Numerical. Simulation. International Journal of Fluid Machinery and Systems Vol. 2, No. 4, October-December 2009.

References

1. Zolotarevich V.P., Salienko A.E., Frumen A.I., Yugov N.V. Issledovanie sobstvennykh chastot i form kolebaniy lopasti rabochego kolesa radial'no-osevoy gidroturbinyna osnove primeneniya sovmestnogo metoda konechnykh i granichnykh elementov. Morskie intellektual'nye tekhnologii (Study of natural frequencies and mode shapes of the blade of the runner francis turbine on the basis of application coupled bem-fem methods, Marine intelligent technologies) №2(32), Saint Petersburg, 2016.
2. Yugov N.V. Primenenie metodov konechnykh i granichnykh elementov k issledovaniyam dinamicheskikh i akusticheskikh kharakteristik transportnykh sredstv i inzhenernykh sooruzheniy. Doklad na XVII Mezhdunarodnoy konferentsii “Matematicheskoe modelirovanie v mekhanike sploshnykh sred na osnove metodov granichnykh i konechnykh elementov” (The application of finite and boundary elements methods to the research dynamic and acoustic characteristics of vehicles and engineering structures. Proceedings of the XVII International conference “Mathematical modeling in mechanics of continuous environments on the basis of methods of finite and boundary elements”), Saint-Petersburg, 1999, pp. 305-308.
3. Simin N.O., Tislenko I.N., Yugov N.V. Chislennyy analiz zvukoizlucheniya zamknutykh obolochek metodom konechnykh i granichnykh elementov vblizi kharakteristicheskikh chastot. Trudy vtoroy mezhdunarodnoy konferentsii po sudostroeniyu (Numerical analysis of sound radiation closed shell

coupled finite and boundary elements method near characteristic frequencies. Proceedings of the second international conference on shipbuilding). Saint-Petersburg, 1998, pp. 213-220.
4. Yugov N.V., Simin N.O. Programmnyy kompleks po raschetu akusticheskikh poley korpusov sudov. Trudy vtoroy mezhdunarodnoy konferentsii po sudostroeniyu (Software for calculation of acoustic fields of ships ' hulls. Proceedings of the second international conference on shipbuilding). Saint-Petersburg, 1998, pp. 124-129.
5. Yugov N.V. Komp'yuternaya sistema akusticheskogo proektirovaniya transportnykh sredstv i inzhenernykh sooruzheniy. Doklad na XXIV konferentsii Assotsiatsii Avtomobil'nykh inzhenerov “Problemy kachestva i sertifikatsii transportnykh sredstv” (Computer system acoustic design of vehicles and engineering structures. Report on the XXIV conference of the Association of Automotive engineers “problems of quality and certification of vehicles”), Dmitrov, Moscow region, 1998, pp. 179-184.
6. Yugov N.V., Minin R.A., Zolotarevich V.P. Opredelenie kharakteristik raspredeleniya gidroakusticheskikh poley sudov metodom granichnykh i konechnykh elementov. Doklad na XVIII Mezhdunarodnoy konferentsii “Matematicheskoe modelirovanie v mekhanike sploshnykh sred na osnove metodov granichnykh i konechnykh elementov” (Determination parameters of the distribution of hydro acoustic fields of ships using coupled boundary and finite elements method. Report on the XVIII International conference “Mathematical modeling in mechanics of continuous environments on the basis of methods of boundary and finite elements”). Saint-Petersburg, 2000, pp. 123-128
7. B. Graf, L. Chen. Correlation of Acoustic Fluid-Structural Interaction Method for Modal Analysis with Experimental Results of a Hydraulic Prototype Turbine Runner in Water. PROCEEDINGS OF ISMA,2010.
8. Stefan Lais, Quanwei Liang, Urs Henggeler, Thomas Weiss, Xavier Escaler ,Eduard Egusquiza. Dynamic Analysis of Francis Runners – Experiment and Numerical. Simulation. International Journal of Fluid Machinery and Systems Vol. 2, No. 4, October-December 2009.

Энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

удк 681.518.54

АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ РОТОРНОГО КОРАБЕЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ ВИБРАЦИИ

Рогов Станислав Сергеевич
Магистр, ведущий специалист ЗАО «Технические системы и технологии»
197183, Санкт-Петербург, Приморский просп., 43
e-mail: rogov_stas@tst-spb.ru

Хруцкий Олег Валентинович
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры судовой автоматики и измерений
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: obx47@mail.ru

Аннотация

Рассматривается алгоритм прогнозирования технического состояния роторных узлов корабельного энергетического оборудования по параметрам вибрации. Исходной предпосылкой является предположение о том, что изменение вибрации объекта контроля во времени подчиняется некоторому детерминированному закону, который сохраняется неизменным как на интервале наблюдений за роторным узлом (базовом прогнозном периоде), так и на интервале прогнозирования. Располагая аналитическим описанием этого закона можно оценить ожидаемые изменения вибрации роторного узла путём экстраполяции. Неизбежные случайные флуктуации временного ряда можно довести до приемлемого уровня дисперсии применением известных операторов сглаживания, таких как операторы математического ожидания, текущего среднего, экспоненциального сглаживания и менее известных – интегральных. В статье рассматривается применение малоизвестного интегрального оператора сглаживания на основе оператора L-преобразования. Работоспособность алгоритма подтверждена конкретным примером.

Ключевые слова: корабельная энергетическая установка, техническая диагностика, алгоритм, временной ряд, прогноз.

The algorithm of forecasting of the technical condition of rotary nodes of ship power equipment for vibration parameters

Rogov Stanislav Sergeevich
Mages, senior specialist of CJSC «Technical systems and technologies»
Primorski prospect, 43, St. Petersburg, 197183
e-mail: rogov_stas@tst-spb.ru

Khrutsky Oleg Valentinovich
Doctor of technical sciences, professor,
professor of Departament of ship automation and measurement,
St. Petersburg state marine technical university,
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008
e-mail: obx47@mail.ru

Abstract

The subject of the article is the technical state prediction algorithm of the rotary units of ship power equipment due to the vibration parameters. It is based on the assumption that the variation in time in the vibration of the monitored object is the subject to a certain deterministic law that is constant as on the observation interval over the rotary unit and on the prediction interval as well. With knowledge of the analytical description of this law, it is possible to evaluate the expected changes in vibration of the rotary unit by extrapolation method. The unavoidable random fluctuations of time series can be reduced to the acceptable dispersion level by using the known smoothing operators, such as expectation operators, operators of current medium and exponential smoothing, and less known integral operators. The article describes the use of the relatively unknown integral smoothing operator based on the L-type transformation operator. The algorithm efficiency is verified with the specific example.

Keywords: ship power equipment, technical diagnostics, algorithm, time series, forecast.

Введение

Корабельная энергетическая установка (КЭУ) относится к классу сложных системотехнических комплексов, структура и свойства которой определяются составом комплектующего корабельного энергетического оборудования (КЭО). Эффективную эксплуатацию КЭУ определяет не только конструктивное исполнение и надёжность КЭО, принятая стратегия технического обслуживания и ремонта (ТО и Р), но и система мониторинга текущего технического состояния.

Согласно [1], под мониторингом понимается единство четырёх последовательно выполняемых операций: индикации технического состояния (собственно диагностики); анализа результатов индикации по выработанным априори алгоритмам; прогнозирования с получением количественных оценок остаточных уровней долговечности и формирование оптимальной стратегии восстановительных работ по результатам мониторинга. По определению, долговечность - свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта [2]. Как видно, до наступления предельного состояния, КЭО проходит ряд ТО и Р, необходимость которых должна быть подтверждена анализом результатов индикации технического состояния КЭО.

Техническое состояние КЭО в процессе эксплуатации определяется действием ряда деструктивных факторов, снижающих его работоспособность. Основными факторами, согласно [3], являются: длительные статические нагрузки; динамические нагрузки; тепловое и деформационное старение материала; вибрационные нагрузки.

В результате совместного воздействия этих факторов ускоряются усталостные и трибологические процессы материала элементов узлов КЭО, что приводит, в частности, к увеличению зазоров между элементами узлов и, как следствие, повышению их виброактивности. Таким образом, индикация виброактивности узлов КЭО позволяет косвенно оценить его текущее техническое состояние (постановить диагноз). В свою очередь, мониторинг, как процесс наблюдения во времени за изменением виброактивности, позволит выполнить прогноз достижения допустимого уровня вибрации узла КЭО. На основании прогноза выдаётся рекомендация о необходимости и времени выполнения технического обслуживания КЭО. Следовательно, возможна организация упреждающей, по прогнозу изменения состояния, стратегия технического обслуживания КЭО [4].

1.Система технического диагностирования

Организация упреждающей по прогнозу стратегии технического обслуживания КЭО требует наличия на борту системы технического диагностирования (СТД) и соответствующего алгоритмического обеспечения системы. На рис.1 представлена функциональная схема системообразующего 16-канального блока обработки сигналов (БОС) ТСТ-4142 [5]. На базе данного блока может быть реализована масштабируемая до необходимого количества контролируемых узлов КЭО модульная СТД. Каждый БОС представляет собой высокопроизводительную локальную измерительно-вычислительную систему асинхронной, параллельной обработки результатов измерений.

Сигналы от датчиков вибрации (ДВ), установленных в реперных точках контролируемых узлов КЭО, поступают на входы 4-х канальных модулей усилителей зарядов (МУЗ). Сигналы частоты вращения роторов соответствующих узлов КЭО от тахометрических датчиков (ДТ) подаются на входы модуля ввода-вывода (МВВ), где нормализуются по амплитуде и длительности. Полученная счётная последовательность импульсов, как и сигналов вибрации, поступает в модуль аналого-цифрового преобразования (МАЦП). Данные модули кроме АЦ-преобразования выполняют функции фильтрации по частоте, привязку частоты вращения ротора к сигналу вибрации конкретного узла, вычисляют параметры сигналов вибрации и пакетируют полученные данные.

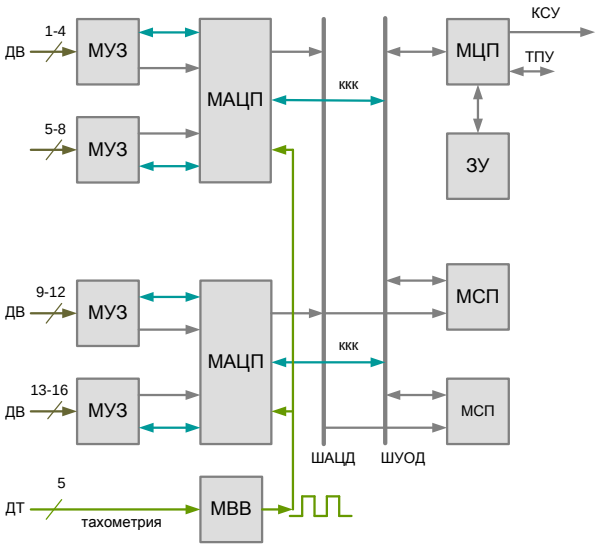


Рис.1. Функциональная схема БОС

Пакеты данных через внутреннюю интерфейсную плату (шина аналого-цифровых данных (ШАЦД) и шина управления и обмена данными (ШУОД)) поступают на модули сигнальных процессоров (МСП), предназначенных для поточной обработки данных: определения общего уровня вибрации, вибрации на частотах вращения, спектров сигналов вибрации и т.д. в соответствии с алгоритмами диагностирования.

Результаты обработки пакетных данных поступают для дальнейшего анализа (собственно постановки диагноза) на модуль центрального процессора (МЦП). МЦП кроме этого обеспечивает управление энергонезависимым запоминающим устройством (ЗУ), связь с комплексной системой управления корабельными техническими средствами (КСУ КТС), а также портативным технологическим пультом управления (ТПУ) на базе ноутбука. Основная функция ТПУ заключается в загрузке программного обеспечения в БОС с учётом кинематических параметров конкретного узла КЭО, а также контроле и диагностике измерительных каналов (линии ККК).

2. Алгоритмическое обеспечение системы технического диагностирования

Алгоритмическое обеспечение СТД имеет структуру, представленную на рис.2. Как видно, она включает четыре алгоритма диагностирования технического состояния основного КЭО: «Турбогенератор», «Турбина», «Редуктор» и «Насос». Данные алгоритмы обеспечивают определение технического состояния отдельных узлов оборудования с постановкой диагноза. Эти алгоритмы включают известные математические модели дефектов отдельных узлов КЭО: подшипников, зубчатых передач, рабочих колёс и ротора.

Рис.3. Алгоритмическое обеспечение КЭО

Алгоритм «Прогноз» в данной структуре является общим. Его математический базис инвариантен по отношению к алгоритмам диагностирования технического состояния отдельных узлов КЭО, т.к. основан на анализе временных рядов (ВР) вибрации.

3. Алгоритм «Прогноз»

Измерение текущего значения общего уровня вибрации (ОУВ) $X(t)$ узлов КЭО выполняется по всем каналам СТД. При этом ведётся сравнение текущих значений ОУВ с уставками допустимых уровней вибрации по каждому узлу. При превышении по одному из каналов уставки (выполнение условия $X(t) \geq 0{,}9X_{доп}$), на пульт оператора выдаётся сигнал, который служит в качестве «стартового» для начала организации процедуры прогнозирования (рис.3).

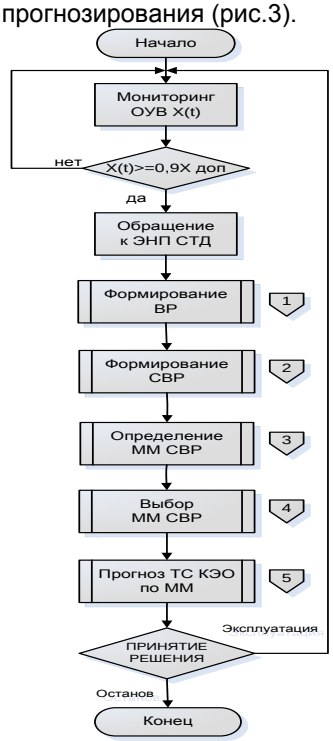


Рис.3. Блок-схема алгоритма

Оператор обращается к ЗУ СТД с целью выбора основания прогноза. В алгоритме этот этап реализуется подпрограммой «Формирование ВР». Временной ряд ОУВ, как случайный процесс, подвергается операции сглаживания на основе применения обобщённого оператора L-преобразования [6]:

$$L_n = t^{-n} X(t) - nt^{-n-1} \int_0^t X(u)du . \qquad (1)$$

При n=1 из (1) получается, что

$$L_1 = [X(t) - 1/t \int_0^t X(u)du]/t = [X(t) - X_{cp}(t)]/t . \qquad (2)$$

Данное выражение принято толковать как L-производную. При n= -1получается выражение:

$$L_{-1} = tX(t) + \int_0^t X(u)du , \qquad (3)$$

называемое L-интегралом.

Применение обобщённого оператора (1) даёт возможность сформировать три сглаженных временных ряда (СВР): на основе L-производной (2) ряд $\breve{X}(t)$, L-интеграла (3) ряд $\hat{X}(t)$ и обычного I-интеграла, как промежуточной операции (2) ряд $\overline{X}(t)$. Данная процедура выполняется подпрограммой «Формирование СВР».

Наличие трёх СВР позволяет с помощью подпрограммы «Определение ММ СВР» найти три математических модели $\tilde{X}(t)$, являющихся результатом решения трёх уравнений регрессий фазовых плоскостей $(\breve{X}, X)$, $(X, \hat{X})$ и $(X, \overline{X})$:

$$\tilde{X}(t) = b_0 + b_1/(1 - a_1 t)^2 , \qquad (4)$$

$$\tilde{X}(t) = a_0/(1 - a_1 t)^2 , \qquad (5)$$

$$\tilde{X}(t) = a_0 \cdot \exp(a_1 t) . \qquad (6)$$

Численные значения коэффициентов ММ (4-6) находятся методом наименьших квадратов.

В свою очередь, наличие трёх ММ СВР позволяет подпрограмме «Выбор ММ СВР» определиться с наилучшей ММ на основе вычисления выборочного коэффициента корреляции

$$\rho_{X\tilde{X}} = [1/n \sum_{i=1}^{n} (X - X_{cp})(\tilde{X} - \tilde{X}_{cp})]/\sigma_X \sigma_{\tilde{X}} , \qquad (7)$$

где σ_X и $\sigma_{\tilde{X}}$ - выборочные дисперсии X и $\tilde{X}$. Из трёх ММ для прогноза технического состояния узла КЭО выбирается та, которая имеет наибольшее значение $\rho_{X\tilde{X}}$.

Прогноз технического состояния узла КЭО основан на определении времени наступления события $X(t) = X_{пред}$, где $X_{пред}$ - предельно допустимое значение ОУВ. Подстановка в выбранную ММ (4-6) $\tilde{X}(t) = X_{пред}$ позволяет определить этот момент времени.

Важным моментом является оценка ожидаемой погрешности прогнозируемого уровня вибрации. Предлагается для этого применить интервальную (доверительную или энтропийную) оценку [7] ширины уровня вибрации:

$$\gamma \approx 0{,}5\sqrt{1 - \rho_{X\tilde{X}}^2} . \qquad (8)$$

Как видно из (8), данная оценка связывает ожидаемую погрешность уровня вибрации с выборочными дисперсиями ВР и СВР относительно средних значений.

Рассмотренные операции с ММ СВР выполняет подпрограмма «Прогноз ТС КЭО по ММ».

4.Проверка работоспособности алгоритма

На рис.4 приведён экспериментальный ВР вибрации подшипника качения с дефектом внутреннего кольца, полученный в результате ускоренных испытаний [8]. Основанием прогноза изменения вибрации подшипника послужил ВР $X(t)$ до $t = 15$ч.

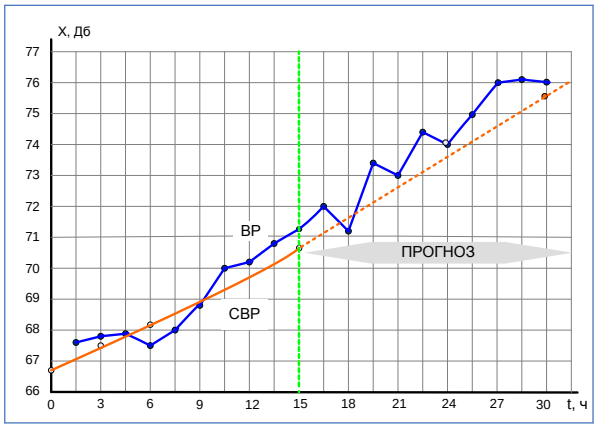
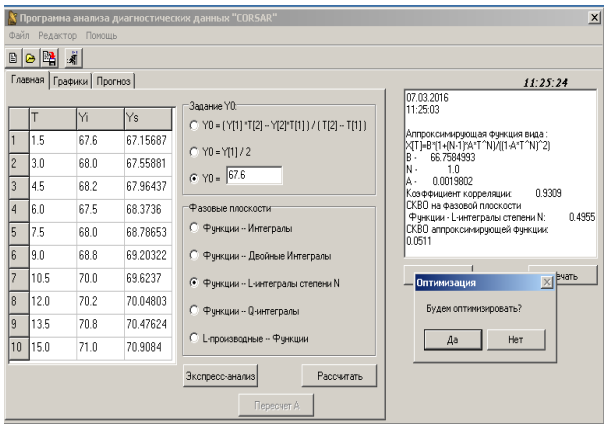


Рис.4. ВР подшипника качения

Обработка ВР с помощью одной из версий программного обеспечения алгоритма «Прогноз» (рис.5) показала, что наилучшей ММ следует считать модель (5):

$$\tilde{X}(t) = 66{,}75/(1 - 0{,}00198t)^2 , \qquad (9)$$

с выборочным коэффициентом корреляции между ВР и СВР $\rho_{X\tilde{X}} = 0{,}9309$.



	T	Yi	Ys
1	1.5	67.6	67.15687
2	3.0	68.0	67.55881
3	4.5	68.2	67.96437
4	6.0	67.5	68.3736
5	7.5	68.0	68.78653
6	9.0	68.8	69.20322
7	10.5	70.0	69.6237
8	12.0	70.2	70.04803
9	13.5	70.8	70.47624
10	15.0	71.0	70.9084

Рис.5. Экран обработки ВР подшипника качения

Вибрация подшипника качения по прогнозу ММ СВР (9) к моменту времени $t = 30$ч должна быть $X(t) = 74{,}45$Дб. Таким образом, ошибка прогноза по уровню вибрации составила $\Delta_X = 1{,}55$Дб или $\delta_X \approx 0{,}021$.

Оценка погрешности возможного уровня вибрации соответствии с выражением (8) составляет $\gamma \approx 0{,}18$. Как видно, прогноз возможного уровня вибрации подшипника качения не противоречит результатам эксперимента.

Заключение

Рассмотренный материал показывает возможности обобщённого оператора L-преобразования в процедуре сглаживания ВР с последующей идентификацией ММ экспериментальных трендов.

Вместе с тем следует принять во внимание известный недостаток методов сглаживания ВР, а именно: оценки для коэффициентов ММ обоснованно получены не для $\tilde{X}(t)$,а для линейных зависимостей фазовых плоскостей. Поэтому в общем случае нельзя гарантировать, что это ММ СВР займёт строго среднее положение в поле точек ВР. Частично устранить этот недостаток можно алгоритмом уточнения [8].

Разработанный алгоритм прогнозирования технического состояния КЭО может быть применён не только к временным рядам вибрации, но и к временным рядам теплотехнических параметров КЭО (температуре, давлению, расходу рабочих сред и т.п.), что подтверждается результатами, приведёнными в работах [9;10].

Литература

1. Василенко В.А., Травин С.Я. Мониторинг технического состояния корабельных ядерных энергетических установок. СПб.: ООО «НИЦ « Моринтех», 2006.
2. Надёжность в технике. Основные понятия и определения. ГОСТ 27.002-89. М.: Изд. Стандартов, 1990.
3. Мясников Ю.Н. Надёжность и техническая диагностика судовых энергомеханических систем (НТДИКА). СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2008.
4. Равин А.А. Методы диагностики судового энергетического оборудования: монография. СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2013.
5. Стационарные системы технического диагностирования специального назначения. Каталог ЗАО «Технические системы и технологии», 2014.
6. Соболев Л.Г. Обработка результатов измерений в судостроении. Л.: Изд-во ЛКИ, 1983.
7. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991.
8. Соболев Л.Г. Операционные методы в задачах идентификации экспериментальных функций тренда. Автоматика и телемеханика, 1997,№2, с.100-107.
9. Хруцкий О.В. Техническая диагностика. СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2005.
10. А. Равин, О. Хруцкий. Прогнозирование технического состояния оборудования. Издатель: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014.

References

1. Vasilenko V.A., Travin S. YA.. Monitoring texnicheskogo sostoyaniya korabelnix yadernyx energeticheskix ustanovok. SPb.: OOO «Morintex», 2006.
2. Nadyozhnost v texnike. Osnovnye ponyatiya i opredeieniya. GOST 27.002-89. M.: Izd. Standartov,1990.
3. Myasnikov YU. N. Nadezhnost i texnicheskaya diagnostika sudovyx energomexanicheskix sistem (NTDIKA). SPb.: CNII im. akad. A.N. Krylova, 2008.
4. Ravin A.A. Metnody diagnostiki sudovogo energeticheskogo oborudovaniya: monografiya. SPb.: Izd. SPBGMTU, 2013.

5. Stacionarnye systemy texnicheskogo diagnostirovaniya specialnogo naznacheniya. Katalog ZAO «Texnicheskie sistemy i texnologii», 2014.
6. Sobolev L.G. Obrabotra rezultatov izmerenij v sudostroenii. L.: Izd-vo LKI, 1983.
7. Novickiy P.V., Zograf I.A. Ocenka pogreshnostej rezultatov izmereniy. L.: Energoatomizdat, 1991.
8. Sobolev L.G. Operacionnye metody v zadachax identifikacii eksperimentalnix funkciy trenda. Avtomatika i telemexanika, 1997, №2, s. 100-107.
9. Khrutsky O.V. Texnicheskaya diagnostika. SPb.: Izd-vo SPBGMTU, 2005.
10. A. Ravin, O. Khutsky. Prognozirovanie texnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya. Izd.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014.

УДК 699.841

ЛИНЕАРИЗАЦИЯ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИТСТИК ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕМПФЕРОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СИСТЕМАХ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ

Островская Надежда Владимировна,
старший преподаватель кафедры теоретической механики и сопротивления материалов
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Рутман Юрий Лазаревич
доктор технических наук, профессор
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
тел. (911) 835-55-52; e-mail: ostrovskaya.nv@yandex.ru

В статье предлагается решение задачи о линеаризации силовых характеристик пластических демпферов, которые часто применяются в системах сейсмоизоляции. Оценка эффективности таких систем в первом приближении может быть проведена на основе линеаризованной динамической модели. Рассеивание энергии в демпферах осуществляется за счет гистерезисных петель, возникающих в процессе пластического деформирования. Поэтому задача линеаризации нелинейных силовых характеристик демпферов, включающих в себя петли гистерезиса, актуальна.

Для линеаризации силовых характеристик демпферов рассмотрен метод прямой линеаризации. Нелинейные силовые характеристики описаны с помощью принципа Мазинга. Получены аналитические зависимости для эффективной жесткости и коэффициента потерь. В качестве численного примера приведено построение зависимостей эффективных жесткостей и коэффициента потерь для кусочно-линейной аппроксимации силовой характеристики. Обнаружено существование оптимума, вблизи которого рекомендовано проектировать основные характеристики демпфера.

Ключевые слова: метод прямой линеаризации, пластические демпферы, силовая характеристика, эффективная жесткость, коэффициент потерь.

THE LINEARIZATION OF PLASTIC DAMPERS POWER CHARACTERISTICS APPLIED IN SEISMOISOLATION SYSTEMS

Ostrovskaya Nadejda Vladimirovna
the major teacher of department of theoretical mechanics and strength of material
State marine technical university of Saint-Petersburg
Rutman Juriy Lazarevich
the professor, Dr.Sci.Tech.
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg, 190008, Russian Federation
e-mail: ostrovskaya.nv@yandex.ru

The solution of a task on linearization of hysteretic force characteristic of plastic dampers which are often applied in seismoisolation systems is proposed In the article. The assessment of such systems efficiency can be as a first approximation carried out on the basis of the linearized dynamic model. Energy dissipation in plastic dampers is carried out at the expense of the hysteresis loops arising in the course of plastic deformation. Therefore the problem of linearization of the dampers nonlinear hysteretic force characteristic including hysteresis loops is actual.

The method of direct linearization to linearise dampers hysteretic force characteristic is considered In the article. Nonlinear hysteretic force characteristic are described by means of the Mazings principle. Analytical dependences for effective rigidity and coefficient of losses are received. Creation of effective rigidity and coefficient of losses dependences for piecewise-linear approximation of the hysteretic force characteristic is given as a numerical example.

Keywords: method of direct linearization, plastic dampers, hysteretic force characteristic, effective rigidity, coefficient of losses.

Введение

В качестве диссипативных элементов систем сейсмоизоляции (ССИ) часто используют пластические демпферы [1,2]. Эти демпферы имеют ярко выраженную нелинейную силовую характеристику. В соответствии с указаниями Свода Правил [3] расчет таких ССИ можно производить, используя линеаризацию силовых характеристик элементов ССИ.

Ниже рассматривается метод прямой линеаризации применительно к силовым характеристикам пластических демпферов. Исследование самих силовых характеристик демпферов рассмотрено в работах [4,5].

Для описания петель гистерезиса демпферов использован принцип Мазинга [6]. Линеаризация выполняется на основе методики, предложенной в работе Скворцова В.Р. [7].

1. Постановка задачи

Рассмотрим уравнение динамики системы с одной степенью свободы в общем виде [8]:

$$m\ddot{u} + P(u,\dot{u}) = F(t), \qquad (1)$$

где $P(u,\dot{u})$ – некоторая нелинейная функция; $F(t)$ – нестационарное внешнее воздействие.

Задача линеаризации уравнения (1) состоит в определении параметров c и a в уравнении (2), в котором затухание учтено по теории Сорокина Е.С.:

$$-m\omega^2 u_0 + (c + ia)u_0 = F. \qquad (2)$$

В (2) c является эффективной жесткостью, а a – эффективным параметром диссипации.

Одним из показателей качества демпфирования является их отношение $\chi = \frac{a}{c}$, называемое коэффициентом потерь.

2.1 Метод прямой линеаризации

В основе метода лежит замена нелинейной характеристики $P(u)$ линейным выражением $P_*(u) = cu + ia$ со специально подбираемыми коэффициентами c и a. Предположим при этом, что характеристика восстанавливающей силы $P(u)$ симметрична, т.е. $P(u) = -P(-u)$. Например, при $a = 0$ коэффициент c можно выбрать из условия минимума интеграла:

$$I(c) = \int_{-u_0}^{u_0} \{[P(u) - cu]\rho(u)\}^2 du, \qquad (3)$$

выражающего меру взвешенного квадратичного отклонения реальной характеристики от линейной на интервале $(-u_0, u_0)$, где u_0 – полуразмах колебаний (рис. 1).

В простейшем случае, когда отклонения считаются в одинаковой мере важными независимо от значения координаты u, принимают $\rho(u) \equiv 1$, тогда:

$$c = \frac{1}{u_0^2}\frac{3}{2}\int_{-u_0}^{u_0} P_{cp}(u)u\,du. \qquad (4)$$

Если же желательно учесть, что более существенны отклонения при больших значениях u, то можно принять, например, $\rho(u) \equiv u$. В последнем случае из условия $\frac{dI}{d(c)} = 0$ находим:

$$c = \frac{5}{2u_0^5}\int_{-u_0}^{u_0} P(u)u^3 du = \frac{5}{u_0^5}\int_{0}^{u_0} P(u)u^3 du. \qquad (5)$$

Параметр c, очевидно, представляет собой эффективную жесткость системы (квадрат частоты свободных колебаний).

Метод прямой линеаризации также распространяется на случай несимметричной характеристики $P(u)$; он применим и при изучении колебаний с диссипацией, а также вынужденных колебаний [9].

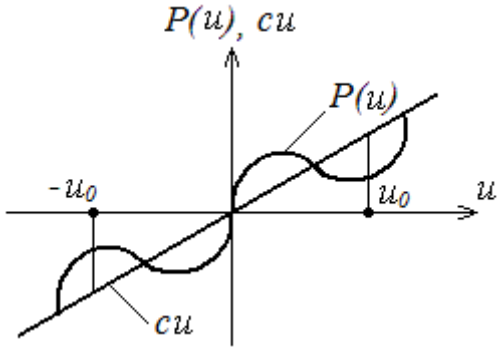


Рис. 1. Пример нелинейной характеристики $P(u)$

2.2 Вывод аналитических зависимостей

Найдем аналитические зависимости для эффективной жесткости и коэффициента потерь с использованием принципа Мазинга.

Применительно к силовым характеристикам, имеющим петли гистерезиса, метод прямой линеаризации рассмотрен в [7].

В этой работе показано, что от зависимостей $P_+(u)$, $P_-(u)$, $P_{cp}(u)$ удобно перейти к обратным зависимостям $u_+(P)$, $u_-(P)$, $u_{cp}(P)$, тогда:

$$c = \frac{3}{8u_0^3}\int_{-u_0}^{u_0}\left(2u_0^2 - u_-^2(P) - u_+^2(P)\right)dP, \qquad (6)$$

$$a = \frac{1}{\pi u_0^3}\int_{-u_0}^{u_0}\left(u_-(P) - u_+(P)\right)dP,\ u_0 = u_{cp}(P). \qquad (7)$$

Построение силовой характеристики пластического демпфера при первом нагружении для различных поперечных сечений и конфигураций стальных стержней, входящих в состав демпфера, подробно рассмотрено в [4,5].

Характеристика первого нагружения хорошо аппроксимируется тремя линейными участками – рис. 2:

$$P_0(u_0) = \begin{cases} c_0 u_0, & u_0 \le u_1 \\ c_0[(1-\psi)u_1 + \psi u_0], & u_1 \le u_0 \le u_2 \\ c_0[(1-\psi)u_1 + (\psi-\eta)u_2 + \eta u_0], & u_0 \ge u_2 \end{cases} \qquad (8)$$

где жесткость c_0 – отвечает упругому деформированию, ψ – соотношение наклона 2 и 1 участков, η – соотношение наклона 3 и 1 участков, u_1, u_2 – определяют границы 2-го и 3-го участков.

На рис. 2 проиллюстрирован пример трехкусочно-линейной зависимости и обозначено:
1 – начальная силовая характеристика $P_0(u_0)$;

2 – отрицательная ветвь петли гистерезиса $P_-(u)$; 3 – положительная ветвь петли гистерезиса $P_+(u)$; 4 – среднее значение $P_{cp} = \frac{1}{2}(P_+(u) + P_-(u))$.

Применим к описанию силовых характеристик принцип Мазинга [7].

$$u_0 = \Phi(P_0),\ -P_0 \le P \le P_0,\ u_+ = -\Phi(P_0) + 2\Phi\left(\frac{P_0 + P}{2}\right),$$

$$u_- = \Phi(P_0) - 2\Phi\left(\frac{P_0 - P}{2}\right). \quad (9)$$

Используя интегралы (6) и (7), получим:

$$c = \frac{1}{u_0^3}\left(12\int_0^{u_0} P_0(u)u\,du - 6u_0\int_0^{u_0} P_0(u)du\right), \quad (10)$$

$$a = \frac{4}{\pi}\frac{1}{u_0}\left(2\int_0^{u_0} P_0(u)du - P_0(u_0)u_0\right). \quad (11)$$

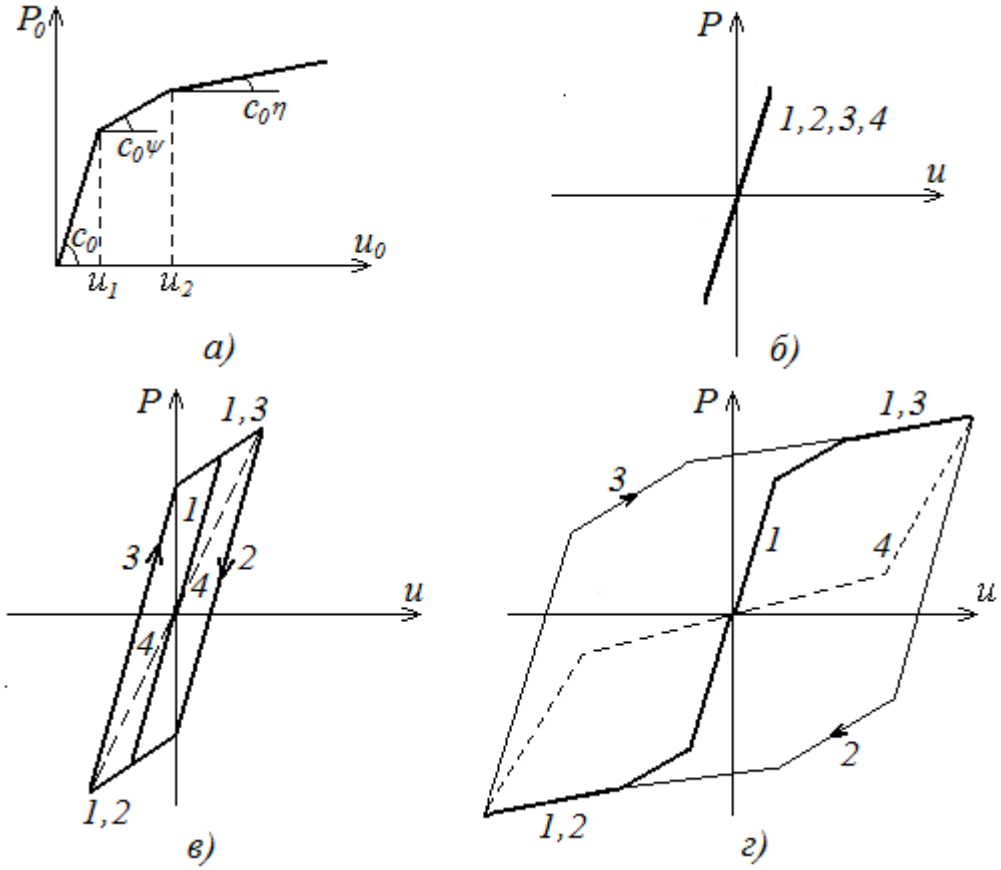


Рис. 2. Силовые характеристики при трех-линейно-кусочной аппроксимации: а) простое нагружение; б) циклическое нагружение при $u_0 < u_1$; в) циклическое нагружение при $u_1 < u_0 < u_2$; г) циклическое нагружение при $u_0 > u_2$

Окончательно, активная жесткость отнесенная к c_0, и коэффициент потерь записывается следующими зависимостями от $\tau_1 \equiv \frac{u_0}{u_1}, \tau_2 \equiv \frac{u_2}{u_1}$:

$$\frac{c}{c_0} = \begin{cases} 1\ ,\ \tau_1 \le 1 \\ \psi + 3\frac{1-\psi}{\tau_1^2} - 2\frac{1-\psi}{\tau_1^3}\ ,\ 1 \le \tau_1 \le \tau_2 \\ \eta + 3\frac{(1-\psi)+(\psi-\eta)\tau_2^2}{\tau_1^2} - 2\frac{(1-\psi)+(\psi-\eta)\tau_2^3}{\tau_1^3}\ ,\ \tau_1 \ge \tau_2 \end{cases}; \quad (12)$$

$$\chi = \frac{a}{c} = \begin{cases} 0\ , \ \tau_1 \le 1 \\ \dfrac{4}{\pi}\dfrac{(1-\psi)\left(\tau_1^2-\tau_1\right)}{\psi\tau_1^3+3(1-\psi)\tau_1-2(1-\psi)}\ , \ 1\le\tau_1\le\tau_2 \\ \dfrac{4}{\pi}\dfrac{\left[(1-\psi)+(\psi-\eta)\tau_2\right]\tau_1^2-\left[(1-\psi)+(\psi-\eta)\tau_2^2\right]\tau_1}{\eta\tau_1^3+3\left[(1-\psi)+(\psi-\eta)\tau_2^2\right]\tau_1-2\left[(1-\psi)+(\psi-\eta)\tau_2^3\right]}\ , \ \tau_1\ge\tau_2 \end{cases} . \quad (13)$$

3. Числовой пример

Приведем пример построения зависимостей эффективных жесткостей и коэффициента потерь для трех кусочно-линейной аппроксимации силовой характеристики.

Формулами (12) и (13) полностью описаны относительные характеристики амортизаторов. Расчет производился для силовых характеристик ССИ маятникового типа, описанных в работах [1, 10]. Однако, для более точной аппроксимации силовая характеристика представлена в виде три-линейно-кусочной (рис. 3) с параметрами, сведенными в таблицу 1.

На рис. 4 и 5 показаны кривые относительной эффективной жесткости и коэффициента потерь для расчетных параметров силовых характеристик, приведенных в таблице 1.

Все кривые для относительной жесткости качественно близки: происходит снижение от 1 до η , насыщение достигается при $\tau_1 = 10 \div 20$. Коэффициенты потерь χ начинаются с нуля, быстро достигают максимума и затем затухают.

Наличие максимума для коэффициента потерь говорит о существовании некоего оптимума, вблизи которого уместно проектировать основные характеристики амортизатора. Вопрос об оптимальном выборе τ_1 должен решаться в зависимости от диапазона амплитуд силовых воздействий, ограничений на жесткость и напряжения.

Заключение

1. Получены аналитические зависимости кривых относительной эффективной жесткости и коэффициента потерь на основе метода прямой линеаризации для трех-кусочно-линейной аппроксимации характеристики простого нагружения.

2. Найдены численные значения аналитического решения и построены кривые относительной эффективной жесткости и коэффициента потерь для различных параметров силовых характеристик пластических демпферов. Обнаружено существование оптимума, вблизи которого уместно проектировать основные характеристики демпфера.

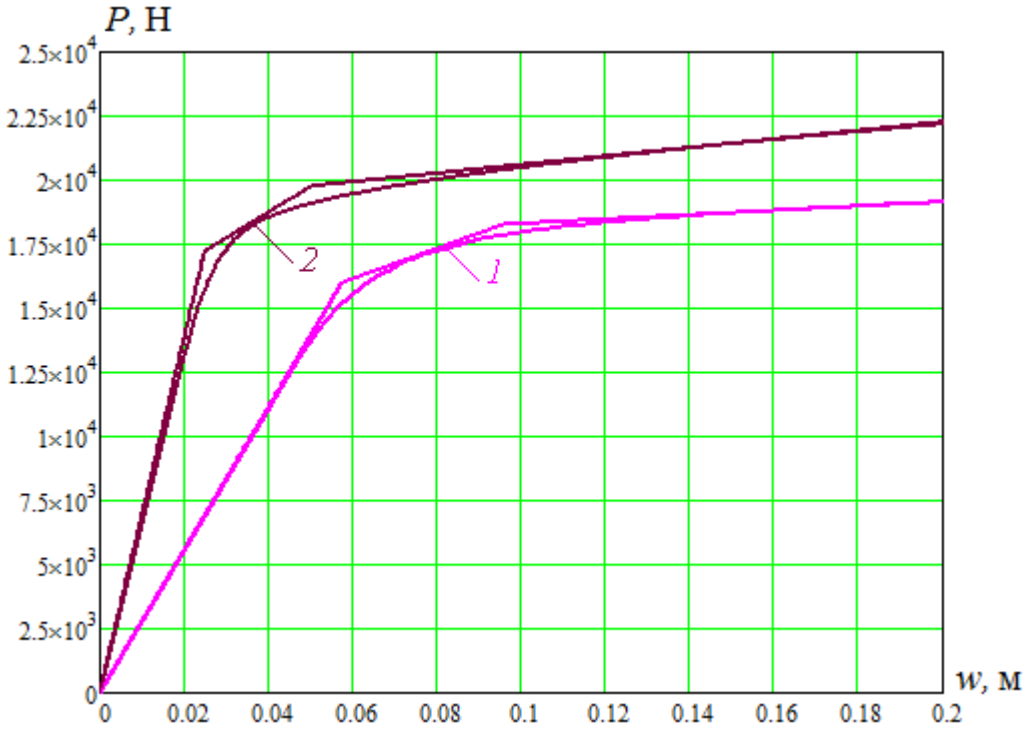


Рис. 3. Трилинейные аппроксимации силовых характеристик пластических демпферов

Таблица 1. Параметры три-кусочно-линейных аппроксимаций силовых характеристик пластических демпферов

№ силовой характеристики	P_1 кН	P_2 кН	P_3 кН	u_1 м	u_2 м	u_3 м
1	17.25	19.75	22.25	0.025	0.05	0.2
2	16	18.25	19.15	0.0575	0.0955	0.2

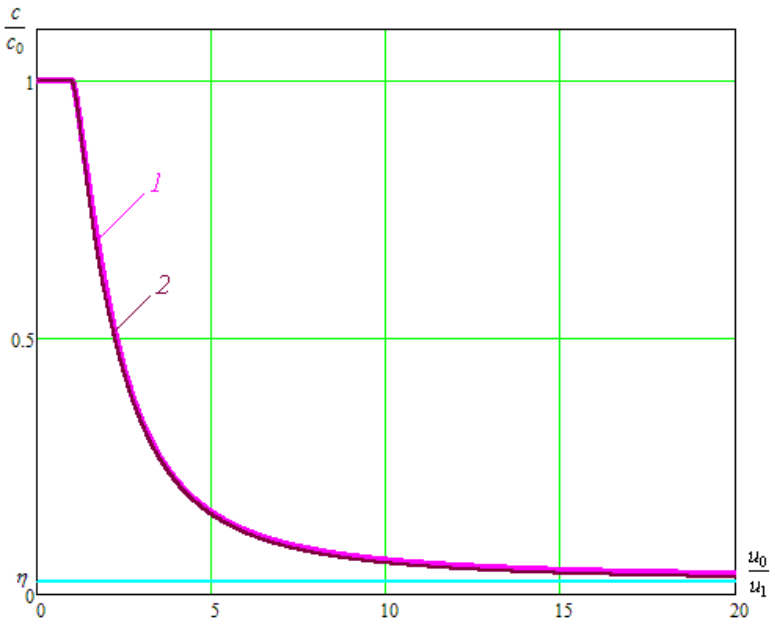


Рис. 4. Кривые относительной эффективной жесткости (1,2 – № силовых характеристик)

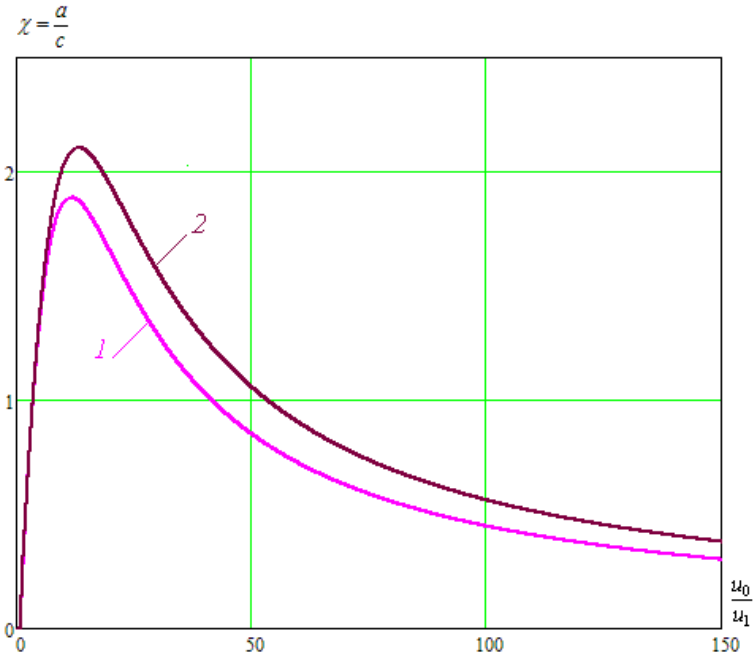


Рис. 4. Кривые коэффициента потерь (1,2 – № силовых характеристик)

Литература

1. Беляев В.С., Гуськов В.Д., Долбенков В.Г., Рутман Ю.Л. Устройства для сеймсоизоляции зданий, промышленных объектов и их оборудования // Вестник ИНЖЭКОНА. Серия: технические науки. 2007. № 6(19). С. 114-121.

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

3. СП XXX.13330.2014. Здания сейсмостойкие и сейсмоизолированные. Правила проектирования. – Москва, 2014. – 50 с.

4. Ковалева Н.В., Скворцов В.Р., Рутман Ю.Л. Определение параметров силовой диаграммы пластически деформируемых элементов конструкции // Сборник «Труды Двадцать второй международной конференции «Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов». СПб: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ. 2007. С. 220-225.

5. Островская Н.В. Определение параметров силовой диаграммы пластически деформируемого криволинейного стержня круглого сечения // Вестник гражданский инженеров, № 4(51), 2015, СПб, С. 68–73.

6. Москвитин, В.В. Пластичность при переменных нагружениях. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1965. – 263 с.

7. Скворцов В.Р. Деформирование существенно неоднородных тонкостенных конструкций и его анализ в рамках концепции оболочки со структурой: автореферат дис. ... доктора технических наук: 01.02.04. СПб, 1992. – 39 с.

8. Вибрации в технике. Справочник. В 6-ти т. Т.2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И Блехмана. М.: Машиностроение, 1979. – 351 с.

9. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний. – М: Наука, 1989. – 257 с.

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

References

1. Beljaev V.S., Gus'kov V.D., Dolbenkov V.G., Rutman Ju.L (2007) Ustrojstva dlja sejmsoizoljacii zdanij, promyshlennyh obektov i ih oborudovanija [Devices for a seymsoizolyation of buildings, industrial facilities and their equipment], Bulletin INZhJeKONA. Series: technical science, № 6(19), 114-121.

2. Ostrovskaja, N.V. (2014) Analiz osnovnyh podhodov k proektirovaniju parametrov plasticheskogo dempfirovanija v sistemah sejsmoizoljacii [The analysis of the basically ways to design plastic damping parameters in seismoisolation systems] MORINTEX, №3(24), 61-66.

3. SP XXX.13330.2014. Zdanija sejsmostojkie i sejsmoizolirovannye. Pravila proektirovanija [Buildings aseismic and seismoisolated. Rules of design]. Moscow, 2014, 50 p.

4. Kovaleva N.V., Skvorcov V.R., Rutman Ju.L. Opredelenie parametrov silovoj diagrammy plasticheski deformiruemyh jelementov konstrukcii [Determination of parameters of the power chart of plastically deformable elements of a design] Sbornik «Trudy 22 mezhdunarodnoj konferencii «Matematicheskoe modelirovanie v mehanike sploshnyh sred. Metody granichnyh i konechnyh jelementov» (Proc. 22th Int. Conf. « Mathematical modeling in mechanics of continuous environments. Methods of boundary and final elements »). Saint-Petersburg, Izd-vo NIC MORINTEH, 2007, pp. 220-225.

5. Ostrovskaja N.V. (2015) Opredelenie parametrov silovoj diagrammy plasticheski deformiruemogo krivolinejnogo sterzhnja kruglogo sechenija [Determination of parameters of the power chart of plastically deformable curvilinear core of round section], Messenger civil engineers, № 4(51), 68–73.

6. Moskvitin, V.V. Plastichnost' pri peremennyh nagruzhenijah [Plasticity at variable loadings]. Moscow.: Izd-vo Mosk. Un-ta, 1965, 263 p.

7. Skvorcov V.R. Deformirovanie sushhestvenno neodnorodnyh tonkostennyh konstrukcij i ego analiz v ramkah koncepcii obolochki so strukturoj [Deformation of essential non-uniform thin-walled designs and his analysis within the concept of a cover with structure]: avtoreferat dis. ... doktora tehnicheskih nauk: 01.02.04. Saint-Petersburg, 1992, 39 p.

8. Vibracii v tehnike. Spravochnik. V 6-ti t. T.2. Kolebanija nelinejnyh mehanicheskih sistem [Vibrations in equipment. Reference book. In 6 t. T.2. Fluctuations of nonlinear mechanical systems]. Pod red. I.I Blehmana. Moscow, Mashinostroenie, 1979. 351 p.

9. Panovko Ja.G. Vvedenie v teoriju mehanicheskih kolebanij [Introduction to the theory of mechanical oscillations]. Moscow: Nauka, 1989. 257 p.

10. Rutman, Ju.L. (2012) Majatnikovye sejsmoizolirujushhie opory. Konstrukcija. Raschet. Eksperiment. [The pendular seismoisolating support. Design. Calculation. Experiment], Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal, № 1(27), 37-43.

УДК 532.5.01; УДК 629.7.036.5

ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ТЕОРИИ ТУРБИН И ЛОПАСТНЫХ МАШИН В ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПОСТАНОВКЕ

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

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

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

Аннотация

Рассматривается задача о моменте сил, действующих на жидкость, которая прокачивается через канал, вращающийся вокруг неподвижной оси или точки. Если момент вычисляется относительного оси, вокруг которой вращается канал, решение задачи дает известное турбинное уравнение Эйлера [1-7]. В настоящей работе рассматривается более общий случай.

Во-первых, помимо момента относительно оси вращения, находится момент относительно точки, лежащей на этой оси.

Во-вторых, во избежание возможных ошибок, для получения окончательных результатов используются разные методы, включая нестационарный подход к задаче об установившемся движении (с точки зрения наблюдателя, находящегося в неподвижном пространстве, поле скоростей вращающегося канала и прокачиваемой через него жидкости нестационарное).

Особое внимание обращено на анализ физического смысла полученных результатов. В частности, выявлена роль кориолисовых сил и показано, что классической формулой Эйлера учитывается только часть этих сил.

Ключевые слова: Тензор инерции, производная по вектору, момент относительно оси, момент относительно точки.

BASIC EQUATION OF THE THEORY OF TURBINES AND BLADE MACHINES IN SPATIAL FORMULATION

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

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

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

Abstract

This work is devoted to the determination of the moment of forces, which act on the flow in the channel rotating about immovable axis or point.

If the moment is determined about an axis, the solution is given by well-known Euler's turbine equation. But this problem is more complicated, if the moment has to be determined about a point. To avoid any possible errors various methods were used. In particular, the stationary problem was solved as non-stationary (from the point of view of observer in an immovable coordinate system).

New formula for the moment was obtained, and it was shown, that classical Euler's formula is its special case. The main difference is connected with the inertia forces (including Coriolis): Euler's formula gives a possibility to find only one part of the moment of Coriolis forces.

Mathematical basis of this work is Euler's field description and direct tensor calculus, in particular the derivative with respect to vector.

Key words: Inertia tensor, Moment about an axis, Moment about a point.

1. Первый способ

Схема задачи показана на рис. 1.

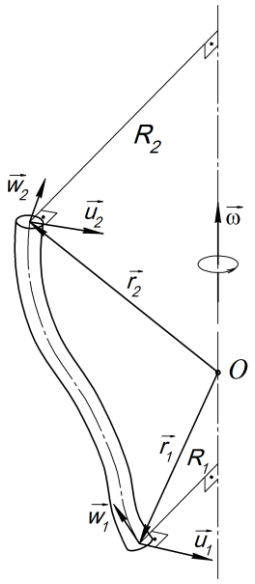


Рис. 1

Предположим, что жидкость сплошь заполняет объем V, ограниченный движущейся жесткой поверхностью, и что в этой поверхности имеются отверстия, через которые жидкость может поступать в объем V и выходить из него. Если сумма расходов на входе и выходе (с учетом знака) равна нулю, т.е. если

$$\oint_S \rho w_n dS = 0, \qquad (1.1)$$

то масса жидкости V в объеме постоянна, а момент $\vec{K}$ ее количества движения за время dt изменяется на величину

$$d\vec{K} = d\int_V \vec{r}\times\vec{v}\rho dV + \oint_S \vec{r}\times\vec{v}\rho w_n dtdS,\ \vec{v} = \vec{u} + \vec{w}. \qquad (1.2)$$

Отсюда следует, что момент сил, действующих на жидкость, равен

$$\vec{M} = \frac{d}{dt}\int_V \vec{r}\times\vec{v}\rho dV + \oint_S \vec{r}\times\vec{v}\rho w_n dS. \qquad (1.3)$$

В этих формулах ρ – плотность жидкости; $\vec{r}$ - радиус-вектор жидкой частицы; $\vec{v}, \vec{u}$ и $\vec{w}$ - ее абсолютная, переносная и относительная скорости; w_n - проекция относительной скорости $\vec{w}$ на внешнюю (по отношению к V) нормаль к S (при $w_n > 0$ жидкость выходит из V).

Первое слагаемое в формуле (1.3) отвечает за силы, обусловливающие движение жидкости, находящейся в объеме V и движущейся вместе с ним по отношению к неподвижному пространству, второе отражает влияние реактивных сил.

Для канала, вращающегося с угловой скоростью $\vec{\omega}$, с учетом того, что в этом случае

$$\vec{v} = \vec{u} + \vec{w}, \quad \vec{u} = \vec{\omega}\times\vec{r}, \qquad (1.4)$$

из (1.3) и (1.2_2) получим

$$\vec{M} = \frac{d}{dt}\int_V \vec{r}\times\left(\vec{\omega}\times\vec{r}\right)\rho dV + \frac{d}{dt}\int_V \vec{r}\times\vec{w}\rho dV + \oint_S \vec{r}\times\vec{v}\rho w_n dS. \qquad (1.5)$$

Полагая для простоты $\rho = const$ и принимая во внимание неизменность V, для $\vec{M}$ будем иметь

$$\vec{M} = \int_V \frac{d}{dt}\left[\vec{r}\times\left(\vec{\omega}\times\vec{r}\right)\right]\rho dV + \int_V \frac{d}{dt}\left(\vec{r}\times\vec{w}\right)\rho dV + \oint_S \left(\vec{r}\times\vec{v}\right)\rho w_n dS. \qquad (1.6)$$

Далее будем рассматривать стационарные задачи. Тогда $\vec{\omega} = const$, а $\vec{u}$ и $\vec{w}$ есть функции только от $\vec{r}$ и зависят от t лишь посредством $\vec{r}$.

Так как производная по времени от любого вектора, жестко связанного с вращающимся телом, равна векторному произведению угловой скорости на этот вектор, то

$$\frac{d}{dt}\left[\vec{r}\times\left(\vec{\omega}\times\vec{r}\right)\right]=\vec{\omega}\times\left[\vec{r}\times\left(\vec{\omega}\times\vec{r}\right)\right] \qquad (1.7)$$

и

$$\frac{d}{dt}\left(\vec{r}\times\vec{w}\right)=\vec{\omega}\times\left(\vec{r}\times\vec{w}\right). \qquad (1.8)$$

Имеем далее*)

$$\vec{r}\times(\vec{\omega}\times\vec{r})=\vec{\omega}r^2-\vec{r}(\vec{r}\bullet\vec{\omega})=\vec{\omega}r^2-\vec{\omega}\bullet(\vec{r}\otimes\vec{r}),$$

так что

$$\vec{r}\times(\vec{\omega}\times\vec{r})=\vec{\omega}\bullet(\vec{r}^2\underline{\underline{E}}-\vec{r}\otimes\vec{r}) \qquad (1.9)$$

и

$$\vec{\omega}\times\left[\vec{r}\times(\vec{\omega}\times\vec{r})\right]=-\left[\vec{r}\times(\vec{\omega}\times\vec{r})\right]\times\vec{\omega}= \\ =-\vec{\omega}\bullet\left(r^2\underline{\underline{E}}-\vec{r}\otimes\vec{r}\right)\times\vec{\omega}. \qquad (1.10)$$

Поэтому

$$\int_V\frac{d}{dt}[\vec{r}\times(\vec{\omega}\times\vec{r})]\rho dV=-\vec{\omega}\bullet\underline{\underline{J}}\times\vec{\omega}, \qquad (1.11)$$

где

$$\underline{\underline{J}}=\int_V\left(\underline{\underline{E}}-\vec{r}\otimes\vec{r}\right)\times\rho dV \quad - \qquad 1.12)$$

тензор инерции.

Имея в виду, что через стенки канала жидкость не течет и что, в силу (1.1),

$$\left(\int_S\rho w_n dS\right)_2=-\left(\int_S\rho w_n dS\right)_1=G, \qquad (1.13)$$

где G – расход жидкости через канал, а индексами 1 и 2 обозначены соответственно входное и выходное сечения канала, для момента $\vec{M}$ получим

$$\vec{M}=-\vec{\omega}\bullet\underline{\underline{J}}\times\vec{\omega}+\int_V\vec{\omega}\times(\vec{r}\times\vec{w})\rho dV+ \\ +G(\vec{r}_2\times\vec{v}_2-\vec{r}_1\times\vec{v}_1). \qquad (1.14)$$

Здесь использована процедура осреднения, так что, например,

$$\vec{r}_2\times\vec{v}_2=\frac{1}{G}\int_{S_2}\left(\vec{r}\times\vec{v}\right)\rho w_n dS. \qquad (1.15)$$

Формулой (1.14) определяется момент, вычисленный относительно точки. Момент относительно оси вращения находится по формуле

$$M_\omega=\vec{M}\bullet\vec{\omega}^\circ,\qquad \vec{\omega}^\circ=\frac{\vec{\omega}}{\omega}. \qquad (1.16)$$

Принимая во внимание, что

$$\left(\vec{A}\times\vec{B}\right)\bullet\vec{A}=0, \qquad (1.17)$$

получим

$$(\vec{\omega}\bullet\underline{\underline{J}}\times\vec{\omega})\bullet\vec{\omega}=(\vec{\omega}\bullet J_{ij}\vec{e}_i)\otimes(\vec{e}_j\times\vec{\omega})\bullet\vec{\omega}=0.$$

Поэтому проекция вектора $-\vec{\omega}\bullet\underline{\underline{J}}\times\vec{\omega}$ на $\vec{\omega}^\circ$ равна нулю. Обращается в нуль, в силу (1.17), и проекция на $\vec{\omega}^\circ$ интеграла от $\vec{\omega}\times(\vec{r}\times\vec{w})\rho$. Таким образом, первые два слагаемых в формуле (1.14) влияния на осевой момент M_ω не оказывают.

Рассмотрим третье слагаемое. Так как

$$\vec{a}\bullet(\vec{b}\times\vec{c})=(\vec{a}\times\vec{b})\bullet\vec{c}, \qquad (1.18)$$

то

$$\vec{\omega}^\circ\bullet(\vec{r}\times\vec{v})=(\vec{\omega}^\circ\times\vec{r})\bullet\vec{v}=\frac{1}{\omega}(\vec{\omega}\times\vec{r})\bullet\vec{v}= \\ =\frac{1}{\omega}(\vec{u}\bullet\vec{v}). \qquad (1.19)$$

Записывая $\vec{u}$ в виде $\vec{u}=u\vec{u}^\circ$ и учитывая, что $u=\omega R$, где R – расстояние до оси вращения, получим

$$\vec{\omega}^\circ\bullet(\vec{r}\times\vec{v})=\frac{1}{\omega}(\omega R\vec{u}^\circ\bullet\vec{v})=Rv_u, \qquad (1.20)$$

где (рис. 2)

$$v_u=\vec{v}\bullet\vec{u}^\circ=v\cos\alpha \quad - \qquad (1.21)$$

проекция абсолютной скорости $\vec{v}$ на переносную скорость $\vec{u}$.

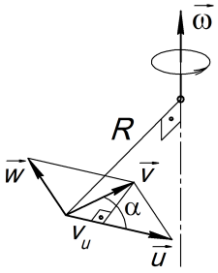


Рис. 2

Таким образом, момент относительно оси вращения оказывается равным

$$M_\omega=G\left(R_2v_2\cos\alpha_2-R_1v_1\cos\alpha_1\right), \qquad (1.22)$$

что полностью совпадает с формулой Эйлера.

Получим еще «гидравлическое» приближение для второго слагаемого в правой части формулы (1.14). Обозначим орт касательной к осредненной линии тока относительного движения через $\vec{l}^\circ$, длину этой линии тока через l. Тогда для искомого приближения подобно (1.15) будем иметь

$$\tilde{\vec{M}}=\int_V\vec{\omega}\times\left(\vec{r}\times\vec{w}\right)\rho dV= \\ =\vec{\omega}\times\int_0^l\int_S\vec{r}\times\vec{l}^\circ w\rho dSdl= \quad **) \qquad (1.23) \\ =G\vec{\omega}\times\int_0^l\vec{r}\times\vec{l}^\circ dl.$$

С учетом (1.23) формула (1.14) для $\vec{M}$ примет вид

$$\vec{M}=-\vec{\omega}\bullet\underline{\underline{J}}\times\vec{\omega}+\tilde{\vec{M}}+G\left(\vec{r}_2\times\vec{v}_2-r_1\times\vec{v}_1\right). \qquad (1.24)$$

Если $G=0$, в формуле (1.24) остается только первое слагаемое. Взятое со знаком минус оно полностью совпадает с формулой для момента сил инерции твердого тела, равномерно вращающегося вокруг неподвижной оси. Физический смысл этого обстоятельства очевиден.

*) Используется аппарат прямого тензорного исчисления (см. Приложение)

**) Формула (1.23) другим путем впервые была получена профессором СПбГПУ д. ф.-м. наук Е.М. Смирновым. Он же обратил внимание и на нестационарный характер задачи (см. [3] и Постановку задачи).

2. Второй способ (см. также [8])

Этот способ основан на использовании принципа Даламбера – искомый момент определяется как взятый со знаком минус момент сил инерции жидкости, находящейся в канале. Таким образом,

$$\vec{M} = \int_V \vec{r} \times \vec{a} dm, \quad \vec{a} = \vec{a}_e + \vec{a}_r + \vec{a}_c . \qquad (2.1)$$

Здесь

$$\vec{a}_e = \frac{d\vec{u}}{dt}, \ \vec{a}_r = \frac{d\vec{w}}{dt}, \ \vec{a}_c = 2\vec{\omega} \times \vec{w}, \ \vec{u} = \vec{\omega} \times \vec{r} . \qquad (2.2)$$

В условиях стационарной задачи ($\vec{\omega} = const$, $\vec{w} = \vec{w}(\vec{r})$)

$$\vec{a}_e = \vec{\omega} \times \vec{u}, \quad \vec{a}_r = \vec{w} \bullet \frac{d\vec{w}}{d\vec{r}} . \qquad (2.3)$$

Формула (2.3_2) означает, что так как задача стационарная, то относительное ускорение, определяемое, например, при $\omega = 0$, имеет только конвективную составляющую (см. также [9, 10]).

Из (2.1), (2.2) и (2.3) следует, что

$$\vec{M} = \int_V \vec{r} \times (\vec{\omega} \times \vec{u}) \rho dV + \int_V \vec{r} \times \left(\vec{w} \bullet \frac{d\vec{w}}{d\vec{r}} \right) \rho dV + \int_V \vec{r} \times (2\vec{\omega} \times \vec{w}) \rho dV . \qquad (2.4)$$

С учетом тождества

$$\vec{a} \times (\vec{b} \times \vec{c}) = (\vec{a} \times \vec{b}) \times \vec{c} + \vec{b} \times (\vec{a} \times \vec{c}) \qquad (2.5)$$

из (2.2_4) и (1.10) вытекают формулы

$$\vec{r} \times (\vec{\omega} \times \vec{u}) = (\vec{r} \times \vec{\omega}) \times \vec{u} + \vec{\omega} \times (\vec{r} \times \vec{u}) = \vec{\omega} \times \left[\vec{r} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) \right] \qquad (2.6)$$

и

$$\vec{r} \times (\vec{\omega} \times \vec{u}) = -\vec{\omega} \bullet (r^2 \underline{\underline{E}} - \vec{r} \otimes \vec{r}) \times \vec{\omega}, \qquad (2.7)$$

из которых следует, что первое слагаемое в правой части формулы (2.4) равно правой части формулы (1.11).

Подынтегральная функция во втором слагаемом формулы (2.4) преобразуется к виду

$$\vec{r} \times \left(\vec{w} \bullet \frac{d\vec{w}}{d\vec{r}} \right) = \vec{w} \bullet \frac{d(r \times \vec{w})}{d\vec{r}} . \qquad (2.8)$$

Действительно (см. Приложение),

$$\frac{d(\vec{r} \times \vec{w})}{d\vec{r}} = \underline{\underline{E}} \times \vec{w} - \frac{d\vec{w}}{d\vec{r}} \times \vec{r} \Rightarrow \vec{w} \bullet \frac{d(\vec{r} \times \vec{w})}{d\vec{r}} = -\vec{w} \bullet \frac{d\vec{w}}{d\vec{r}} \times \vec{r} = \vec{r} \times \left(\vec{w} \bullet \frac{d\vec{w}}{d\vec{r}} \right).$$

Пользуясь формулой (2.8) и принимая во внимание, что $d\vec{w} / d\vec{r} = \vec{\nabla} \otimes \vec{w}$, второе слагаемое в (2.4) перепишем в виде

$$\int_V \vec{r} \times \left(\vec{w} \bullet \frac{d\vec{w}}{d\vec{r}} \right) \rho dV = \int_V \vec{w} \bullet \frac{d(\vec{r} \times \vec{w})}{d\vec{r}} \rho dV = \int_V \vec{w} \bullet \vec{\nabla} \otimes (r \times \vec{w}) \rho dV . \qquad (2.9)$$

В силу закона сохранения массы (плотность ρ, как и выше, предполагается постоянной)

$$\vec{\nabla} \bullet \vec{w} = 0 . \qquad (2.10)$$

Поэтому

$$\vec{\nabla} \bullet (\vec{w} \otimes \vec{r} \times \vec{w}) = \vec{\nabla} \bullet (\vec{w} \otimes \vec{r} \times \vec{w}) + \vec{\nabla} \bullet (\vec{w} \otimes \underbrace{\vec{r} \times}) \vec{w} = (\vec{\nabla} \bullet \vec{w}) \underbrace{(\vec{r} \times \vec{w})} = \qquad (2.11)$$

$$= (\vec{w} \bullet \vec{\nabla})(\vec{r} \times \vec{w}) = \vec{w} \bullet \frac{d(\vec{r} \times \vec{w})}{d\vec{r}} .$$

Из (2.9) и (2.11) следует, что

$$\int_V \vec{r} \times \left(\vec{w} \bullet \frac{d\vec{w}}{d\vec{r}} \right) \rho dV = \int_V \vec{\nabla} \bullet (\vec{w} \otimes \vec{r} \times \vec{w}) \rho dV , \qquad (2.12)$$

и формула Гаусса-Остроградского (см. Приложение) дает

$$\int_V \vec{r} \times \left(\vec{w} \bullet \frac{d\vec{w}}{d\vec{r}} \right) \rho dV = \oint_S \vec{r} \times \vec{w} \rho w_n dS , \qquad (2.13)$$

где $w_n = \vec{n} \bullet \vec{w}$ – проекция вектора $\vec{w}$ на внешнюю нормаль к S.

Преобразуем теперь последнее слагаемое в формуле (2.4). Имеем (с учетом (2.5) и (1.4))

$$\vec{r} \times (\vec{\omega} \times \vec{w}) = (\vec{r} \times \vec{\omega}) \times \vec{w} + \vec{\omega} \times (\vec{r} \times \vec{w}) = -\vec{u} \times \vec{w} + \vec{\omega} \times (\vec{r} \times \vec{w}). \qquad (2.14)$$

Рассмотрим произведение

$$\vec{w} \bullet \frac{d(\vec{r} \times \vec{u})}{d\vec{r}} .$$

Принимая во внимание, что

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

получим

$$\vec{w} \bullet \frac{d(\vec{r} \times \vec{u})}{d\vec{r}} = \vec{w} \bullet \left(\underline{\underline{E}} \times \vec{u} - \frac{d\vec{u}}{d\vec{r}} \times \vec{r} \right) = \vec{w} \times \vec{u} - \vec{w} \bullet \left(-\underline{\underline{E}} \times \vec{\omega} \right) \times \vec{r}.$$

Так как

$$\vec{w} \bullet (\underline{\underline{E}} \times \vec{\omega}) \times \vec{r} = \vec{w} \bullet (\vec{e}_i \otimes \vec{e}_i \times \vec{\omega}) \times \vec{r} = (w_i \vec{e}_i \times \vec{\omega}) \times \vec{r} = (\vec{w} \times \vec{\omega}) \times \vec{r} = \vec{r} \times (\vec{\omega} \times \vec{w}),$$

то

$$\vec{w} \bullet \frac{d(\vec{r} \times \vec{u})}{d\vec{r}} = -\vec{u} \times \vec{w} + \vec{r} \times (\vec{\omega} \times \vec{w}) . \qquad (2.15)$$

Из (2.15) находим еще одно выражение для $\vec{r} \times (\vec{\omega} \times \vec{w})$:

$$\vec{r} \times (\vec{\omega} \times \vec{w}) = \vec{u} \times \vec{w} + \vec{w} \bullet \frac{d(\vec{r} \times \vec{u})}{d\vec{r}} . \qquad (2.16)$$

Суммируя (2.14) и (2.16), приходим к формуле (см. также [11])

$$\vec{r} \times (2\vec{\omega} \times \vec{w}) = \vec{\omega} \times (\vec{r} \times \vec{w}) + \vec{w} \bullet \frac{d(\vec{r} \times \vec{u})}{d\vec{r}} , \qquad (2.17)$$

из которой с учетом (2.8) следует, что сумма двух последних слагаемых в формуле (2.4) равна

$$\int_V \vec{\omega} \times (\vec{r} \times \vec{w}) \rho dV + \int_V \vec{w} \bullet \frac{d}{d\vec{r}} (\vec{r} \times \vec{v}) \rho dV , \qquad (2.18)$$

где, как и в (1.4), $\vec{v} = \vec{u} + \vec{w}$.

По аналогии с переходом от (2.9) к (2.13) второе слагаемое в формуле (2.18) преобразуется к виду

$$\int_V \vec{w} \bullet \frac{d}{d\vec{r}}\left(\vec{r}\times\vec{v}\right)\rho dV = \oint_S \vec{r}\times\vec{v}\rho w_n dS\,. \qquad (2.19)$$

В итоге из (2.18) и (2.19), принимая во внимание (2.7) и (2.4), для $\vec{M}$ получим формулу

$$\vec{M} = -\int_V \vec{\omega}\bullet\left(r^2\underline{\underline{E}} - \vec{r}\otimes\vec{r}\right)\times\vec{\omega}\rho dV + \\ +\int_V \vec{\omega}\times\left(\vec{r}\times\vec{w}\right)\rho dV + \oint_S \vec{r}\times\vec{v}\rho w_n dS, \qquad (2.20)$$

которая так же, как это было сделано в п.1, приводится к формуле (1.24).

Из выполненного в этом пункте анализа следует, что существенную роль в формировании момента сил, действующих на жидкость во вращающемся канале, играют кориолисовы силы инерции, обусловливая ту часть составляющей момента, которая определяется формулой

$$G\left(\vec{r}_2\times\vec{u}_2 - \vec{r}_1\times\vec{u}_1\right)$$

и, таким образом, зависит непосредственно от угловой скорости канала. Кроме того кориолисовым силам инерции обязаны вторые слагаемые в правых частях формул (1.24) и (2.20), но, как было выяснено выше, в формуле для момента M_ω эти слагаемые отсутствуют. Формально математически такой несколько неожиданный результат связан с тем, что согласно (2.14) и (2.16) одно и то же произведение $\vec{r}\times\left(\vec{\omega}\times\vec{w}\right)$, равное половине момента $\vec{r}\times\vec{a}_c$, определяется двумя разными формулами, которые, при суммировании проводятся к $\vec{r}\times\left(2\vec{\omega}\times\vec{w}\right)$.

Изложенные соображения проливают свет на физический смысл формулы Эйлера для M_ω. Из равенства

$$G\left(\vec{r}_2\times\vec{v}_2 - \vec{r}_1\times\vec{v}_1\right) = G\left(\vec{r}\times\vec{u}\big|_1^2 + \vec{r}\times\vec{w}\big|_1^2\right)$$

следует, что момент сил, действующих на жидкость, протекающую через вращающийся канал, создается реактивными (второе слагаемое) и кориолисовыми (первое слагаемое) силами.

3. Третий способ

В этом пункте используется подход Эйлера к описанию кинематики жидкостей [9, 10], причем в связи с тем, что в результате вращения канала его положение в пространстве изменяется во времени, помимо конвективных во внимание принимаются еще и локальные слагаемые. Основные предположения те же, что и выше:

$$\vec{\omega} = \omega\vec{\omega}^\circ = \vec{const}, \quad \vec{w} = \vec{w}\left(\vec{r}\right). \qquad (3.1)$$

Формулы (3.1) означают, что вращение канала и движение жидкости в нем установившиеся и что вращение канала происходит вокруг неподвижной оси.

Пользуясь формулой (2.1) и принимая во внимание известные формулы

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad \text{и} \quad \vec{r}\times\vec{a} = \frac{d}{dt}\left(\vec{r}\times\vec{v}\right), \qquad (3.2)$$

для момента сил, действующих на жидкость, получим

$$\vec{M} = \int_V \left[\frac{\partial\vec{f}}{\partial t} + \left(\vec{u}\bullet\vec{\nabla}\right)\vec{f}\right]\rho dV + \int_V \left(\vec{w}\bullet\vec{\nabla}\right)\vec{f}\,\rho dV\,. \qquad (3.3)$$

Здесь

$$\vec{f} = \vec{r}\times\vec{u} + \vec{r}\times\vec{w}\,, \qquad (3.4)$$

а производная $d\vec{f}\,/\,dt$ представлена в виде суммы локальной и конвективной составляющих.

Обозначим через $\tilde{\rho}, \varphi, z$ координаты, через $\vec{e}_\rho, \vec{e}_\varphi$ и

$$\vec{e}_z = \vec{\omega}^\circ \qquad (3.5)$$

базовые орты цилиндрической системы координат.

Тогда

$$\vec{e}_z\times\vec{e}_\rho = \vec{e}_\varphi, \quad \vec{e}_\rho\times\vec{e}_\varphi = \vec{e}_z, \quad \vec{e}_\varphi\times\vec{e}_z = \vec{e}_\rho; \qquad (3.6)$$

$$\vec{e}_\varphi\bullet\vec{e}_\rho = 0, \quad \vec{e}_\varphi\bullet\vec{e}_\varphi = 1, \quad \vec{e}_\varphi\bullet\vec{e}_z = 0; \qquad (3.7)$$

$$\frac{\partial\vec{e}_\rho}{\partial\varphi} = \vec{e}_z\times\vec{e}_\rho, \frac{\partial\vec{e}_\varphi}{\partial\varphi} = \vec{e}_z\times\vec{e}_\varphi, \frac{\partial\vec{e}_z}{\partial\varphi} = \vec{e}_z\times\vec{e}_z; \qquad (3.8)$$

$$\vec{u} = \omega\tilde{\rho}\vec{e}_\varphi, \vec{\nabla} = \vec{e}_\rho\frac{\partial}{\partial\tilde{\rho}} + \vec{e}_\varphi\frac{1}{\tilde{\rho}}\frac{\partial}{\partial\varphi} + \vec{e}_z\frac{\partial}{\partial z}; \qquad (3.9)$$

$$\vec{f} = f_\rho\vec{e}_\rho + f_\varphi\vec{e}_\varphi + f_z\vec{e}_z\,. \qquad (3.10)$$

Из (3.9), (3.7) и (3.10) следует, что

$$\left(\vec{u}\bullet\vec{\nabla}\right)\vec{f} = \omega\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(f_\rho\vec{e}_\rho + f_\varphi\vec{e}_\varphi + f_z\vec{e}_z\right), \qquad (3.11)$$

откуда, с учетом (3.8), (3.5), (3.1) и (3.10), получим

$$\left(\vec{u}\bullet\vec{\nabla}\right)\vec{f} = \omega\left(\frac{\partial f_\rho}{\partial\varphi}\vec{e}_\rho + \frac{\partial f_\varphi}{\partial\varphi}\vec{e}_\varphi + \frac{\partial f_z}{\partial\varphi}\vec{e}_z\right) + \vec{\omega}\times\vec{f}\,. \qquad (3.12)$$

Для того чтобы найти производную $\partial\vec{f}\,/\,\partial t$, заметим, что она определяется производными от компонент вектора $\vec{f}$ по углу φ и равна нулю, если во всех точках, т.е. на дугах соответствующих окружностей, значение каждой из этих компонент одно и то же.

Предположим теперь, что компоненты вектора $\vec{f}$ есть функции φ и что в некоторой точке неподвижного пространства, отвечающей углу φ, какая-либо из компонент (обозначим ее f) имеет значение $f\left(\varphi\right)$. Через промежуток времени Δt компонента f в этой же точке в результате поворота канала на угол $\Delta\varphi$ окажется равной $f\left(\varphi-\Delta\varphi\right)$. А так как $\Delta\varphi = \omega\Delta t$, то

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{f\left(\varphi-\omega\Delta t\right)-f\left(\varphi\right)}{\Delta t} = \\ = \omega\lim_{\Delta\varphi\to 0}\frac{f\left(\varphi-\Delta\varphi\right)-f\left(\varphi\right)}{\Delta\varphi} = -\omega\frac{\partial f}{\partial\varphi}. \qquad (3.13)$$

Поэтому

$$\frac{\partial \vec{f}}{\partial t} = -\omega\left(\frac{\partial f_\rho}{\partial \varphi}\vec{e}_\rho + \frac{\partial f_\varphi}{\partial \varphi}\vec{e}_\varphi + \frac{\partial f_z}{\partial \varphi}\vec{e}_z\right), \qquad (3.14)$$

а сумма (3.12) и (3.14) оказывается равной

$$\frac{\partial \vec{f}}{\partial t} + \left(\vec{u} \bullet \vec{\nabla}\right)\vec{f} = \vec{\omega} \times \vec{f}\ . \qquad (3.15)$$

Принимая теперь во внимание (3.4), после подстановки (3.15) в (3.3) получим

$$\vec{M} = \int_V \vec{\omega} \times \left(\vec{r} \times \vec{u}\right)\rho dV + \int_V \vec{\omega} \times \left(\vec{r} \times \vec{w}\right)\rho dV + \\ + \int_V \left(\vec{w} \bullet \vec{\nabla}\right)\left(\vec{r} \times \vec{v}\right)\rho dV \qquad (3.16)$$

и, выполняя те же преобразования, что и в п. 1 и п. 2, снова приходим к формулам (1.14) и (1.24).

Приложение

Краткие сведения из векторного и тензорного исчисления [12, 13]

$$\vec{f} = f_i \vec{e}_i, \quad \underline{\underline{\alpha}} = \alpha_{ij}\vec{e}_i \otimes \vec{e}_j,$$

$$\vec{\alpha} \bullet \underline{\underline{E}} = \underline{\underline{E}} \bullet \vec{\alpha} = \vec{\alpha}, \quad \underline{\underline{E}} = \vec{e}_i \otimes \vec{e}_i;$$

$$\vec{a} \bullet (\vec{b} \otimes \vec{c}) = (\vec{a} \bullet \vec{b})\vec{c}\ ;$$

$$\frac{d\vec{f}}{d\vec{r}} = \vec{\nabla} \otimes \vec{f}; \quad \frac{d\left(\vec{a} \times \vec{b}\right)}{d\vec{r}} = \frac{d\vec{a}}{d\vec{r}} \times \vec{b} - \frac{d\vec{b}}{d\vec{r}} \times \vec{a};$$

$$\vec{v} \bullet \frac{d\vec{v}}{d\vec{r}} = \vec{v} \bullet \left(\vec{\nabla} \otimes \vec{v}\right) = \left(\vec{v} \bullet \vec{\nabla}\right)\vec{v}\ .$$

Формула Гаусса-Остроградского

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

$\vec{f}, \vec{A}, \ldots$ – векторы;

$\underline{\underline{\alpha}}$ – тензор, $\underline{\underline{E}}$ - единичный тензор;

$\bullet$ – знак скалярного умножения;

$\times$ – знак векторного умножения;

$\otimes$ – знак тензорного умножения.

Литература

1. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики. М., т. II – 1983. 640 с.
2. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 2005. 416 с.
3. Ломакин А.А. Центробежные и осевые насосы. – М., Л.: Машиностроение, 1966. 364 с.
4. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. – М.: Машиностроение, 1987. 440 с.
5. Андрющенко Р.С., Шилов В.Д., Дементьев Б.Г. и др. Судовое вспомогательное энергетическое оборудование: Л.: Судостроение, 1991. 392 с.
6. Попов Д.Н., Панаиотти С.С., Рябинин М.В. Гидромеханика. – М.: Изд-во МГТУ им. **Н**. Э. Баумана, 2002. 385 с.
7. Трухний А.Д., Ломакин Б.В. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. 540 с.
8. Podolsky M.E. Coriolis inertia forces in the problem of Euler's turbine equation // Proc. of XLI Summer School-Conference"Advanced Problems in Mechanics". St. Peterburg, 2013. P. 439–443.
9. Podolsky M.E. Field description of rotational motion. Proc. of XLI Summer School-Conference" Advanced Problems in Mechanics". St. Peterburg, 2013. P. 431–437.
10. Подольский М.Е. О методе Эйлера в применении к кинематике и динамике твердого тела // Теория механизмов и машин. СПб, 2013. Т. 11. № 2 (22). С. 38–45.
11. Подольский М.Е., Черенкова С.В. Подход Эйлера и прямое тензорное исчисление в задаче о физической природе кориолисовых эффектов // Письма в ЖТФ, 2014. Т. 40, вып. 18. С. 54-57.
12. Подольский М.Е. Физико-механические основы и некоторые инженерные приложения прямого тензорного исчисления. – СПб: Изд-во СПбГМТУ; 2011. 466 с.
13. Подольский М.Е. Тензорное исчисление. Элементарные трактовки и примеры практических приложений // Морской вестник. № 4 (48). 2013. С. 97-100.

References

1. Lojcyanskij L.G., Lur'e A.I. Kurs teoreticheskoj mekhaniki. M., t. II, 1983. 640 s.
2. Targ S.M. Kratkij kurs teoreticheskoj mekhaniki. M.: Vysshaya shkola, 2005. 416 s.

3. Lomakin A.A. Centrobezhnye i osevye nasosy. M., L.: Mashinostroenie, 1966. 364 s.
4. Emcev B.T. Tekhnicheskaya gidromekhanika. M.: Mashinostroenie, 1966. 440 s.
5. Andryushchenko R.S., SHilov V.D., Dement'ev B.G. i dr. Sudovoe vspomogatel'noe ehnergeticheskoe oborudovanie. L.: Sudostroenie, 1991. 392 s.
6. Popov D.N., Panaiotti S.S., Ryabinin M.V. Gidromekhanika. M.: Izd-vo MGTU im. N. EH. Baumana, 2002. 385 s.
7. Truhnij A.D., Lomakin B.V. Teplofikacionnye parovye turbiny i turboustanovki. M.: Izd-vo MEHI, 2002. 540 s.
8. Podolsky M.E. Coriolis inertia forces in the problem of Euler's turbine equation. Proc. of XLI Summer School-Conference"Advanced Problems in Mechanics". St. Peterburg, 2013. P. 439–443.
9. Podolsky M.E. Field description of rotational motion. Proc. of XLI Summer School-Conference" Advanced Problems in Mechanics". St. Peterburg, 2013. P. 431–437.
10. Podol'skij M.E. O metode Ejlera v primenenii k kinematike i dinamike tverdogo tela. Teoriya mekhanizmov i mashin. SPb, 2013. T. 11. № 2 (22). S. 38–45.
11. Podol'skij M.E., CHerenkova S.V. Podhod EHjlera i pryamoe tenzornoe ischislenie v zadache o fizicheskoj prirode koriolisovyh effektov. Pis'ma v ZHTF, 2014. T. 40, vyp. 18. S. 54-57.
12. Podol'skij M.E. Fiziko-mekhanicheskie osnovy i nekotorye inzhenernye prilozheniya pryamogo tenzornogo ischisleniya. SPb: Izd-vo SPbGMTU; 2011. 466 s.
13. Podol'skij M.E. Tenzornoe ischislenie. EHlementarnye traktovki i primery prakticheskih prilozhenij. Morskoj vestnik. № 4 (48). 2013. S. 97-100.

Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства

УДК 658.5.012.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕН НА СУДОСТРОИТЕЛЬНУЮ ПРОДУКЦИЮ

Абрамов Алексей Васильевич
профессор, д.э.н, заведующий кафедрой экономики судостроительной промышленности
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
Когинов Михаил Валентинович
доцент, кандидат технических наук, доцент кафедрой экономики судостроительной промышленности
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
Хмара Дмитрий Сергеевич
доцент, кандидат экономических наук, доцент кафедрой экономики судостроительной промышленности
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: kwp@smtu.ru

Аннотация

Проведен анализ трех основных методов определения себестоимости продукции, используемых в соответствии с применяемыми судостроительными предприятиями нормативно-методическими документами при определении затрат по калькуляционным статьям в актуальной практике

Выявлено, что главной проблемой установления цен на проектные работы и строительство судов является отсутствие современной базы нормативно-методических документов.

Сформулированы и обобщены проблемные вопросы, возникающие противоречия норм и требований нормативно-методических документов, регламентирующих определение цен и затрат по калькуляционным статьям на морскую технику, с практикой деятельности судостроительных предприятий в современных экономических условиях.

На основании анализа выявленных проблем сделаны выводы и сформулированы конкретные предложения по порядку и методике определения затрат по отдельным калькуляционным статьям на морскую технику на стадиях её проектирования и строительства.

Ключевые слова: калькуляция, методика, морская техника, норма удельной трудоемкости постройки, нормативно-методический документ по ценообразованию, оценка трудоемкости проектно-конструкторских работ, судостроительное предприятие, цена.

DETERMINE THE PRICE OF SHIPBUILDING PRODUCTS

Abramov Alexey Vasilevich
the professor, Dr.Sci.Econ., head of the department of economics of the shipbuilding industry
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
Koginov Michael Valentinovich
the associate professor, Cand. Sci.Tech., associate professor of the department of economics of the shipbuilding industryState marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
Khmara Dmitry Sergeevich
the associate professor, Cand. Sci.Econ., associate professor of the department of economics of the shipbuilding industry
State marine technical university of Saint-Petersburg
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: kwp@smtu.ru

Abstract

The analysis of three main methods of determination of product cost used according to the standard and methodical documents applied by the ship-building enterprises when determining expenses for calculation articles in actual practice is carried out.

It was revealed that the main problem of setting prices for design work and construction of vessels is the lack of a modern regulatory framework and guidance documents.

Problematic issues, the arising contradictions of norms and requirements of the standard and methodical documents regulating determination of the prices and expenses under calculation articles for sea equipment with practice of activity of the shipbuilding enterprises in modern economic conditions are formulated and generalized

Based on the analysis of the problems identified conclusions and formulated specific proposals on the procedure and the method of determining the cost of individual calculation items on marine equipment at stages of its design and construction.

Keywords: assessment of the complexity of design work, calculation, marine engineering, methods, price, regulatory guidance document on pricing , shipbuilding enterprise, the rate of the specific complexity of construction.

Введение

Руководством страны в последние годы уделяется особое внимание вопросам «установления справедливых и обоснованных цен на продукцию с длительным технологическим циклом производства или иной высокотехнологичной продукции» [1].

Актуальной проблемой установления цен на проектные работы и строительство судов является отсутствие современной базы нормативно-методических документов, определяющих порядок расчета затрат в разрезе калькуляционных статей.

Проблема вызвана прекращением в судостроении после 1991 года разработок нормативно-методических документов по ценообразованию и трудоемкости строительства судов, а также существенным уменьшением работ по нормированию труда. Текущие работы в этом направлении ведутся недостаточными темпами для их немедленного внедрения.

По итогам проведенного анализа нормативно-методических документов, используемых судостроительными предприятиями при определении цен и затрат по калькуляционным статьям на морскую технику следует констатировать тот факт, что ***большинство документов устарели***.

В настоящее время в судостроении стоимость проектных работ определяется следующими методами [1-16]:

- метод оценки и прогнозирования трудоемкости проектных работ, т.е. стоимость проектных работ определяется перемножением трудоемкости работ на стоимость нормо-часа;
- метод определения стоимости проектирования, исходя из строительной стоимости объекта, т.е. стоимость проектных работ как доля проектных работ в общей стоимости объекта;
- метод определения стоимости проектирования морской техники по соответствующим нормативным документам базовых цен на проектные работы.

Перечисленные методы представляют интерес для дальнейшей разработки методологии оценки стоимости проектирования морской техники. В разработке должно найти отражение распределение трудоемкости проектных работ по стадиям, применение методов нормирования труда, использование статистических данных о доле проектных работ в общей стоимости строительства объекта, данные по базовым ценам на проектные работы в зависимости от общей стоимости строительства и от категории сложности проектирования в процентах и др.

Роль прогнозирования и оценки трудоемкости работ по проектам значительно возросла в современных условиях, когда проектные организации участвуют в тендерах и необходимо объективно определить трудоемкость разработки проекта в целом и оценить стоимость работ с целью получения максимальных преимуществ в процедуре конкурсного отбора.

Показатели трудоемкости разработки проекта того или иного объекта имеют стохастический характер, зависят от множества факторов (включая такие из них, как поисковый/творческий характер работ, особенно на ранних стадиях проектирования), но должны определятся в интересах коммерческой деятельности проектных организаций на основе обработки статистических данных, экспертных оценок и хронометрирования операций.

Публикации, посвященные вопросам оценки трудоемкости проектно-конструкторских работ в судостроительной отрасли, за последние 10-15 лет практически отсутствуют [16].

На основе обработки статистических данных о трудоемкости и сроках разработки проектов в отечественном судостроении были выпущены «Нормативы» [17]. В качестве классификационной базы использовался общесоюзный классификатор продукции [18].

Для основных группировок нормативы представлены в виде зависимости трудоемкости проектных работ от водоизмещения порожнем, разбивки по этапам проектирования с выделением собственных работ и нормативной длительности этапов проектирования и их трудоемкости.

Для вспомогательных нормативных группировок норматив трудоемкости определяется через переходный коэффициент, а разбивка по этапам и их длительность - по основной группировке.

Качественные особенности проектируемых судов и организационно-технический уровень проектной организации учитываются соответствующими качественными коэффициентами экспертного характера, согласованными с исполнителями.

Данные нормативы трудоемкости устанавливаются для следующих этапов проектных работ:

- Эскизный проект;
- Технический проект;
- Разработка рабочей и конструкторской документации.

Стоимость проектных работ определяется перемножением трудоемкости на стоимость нормо-часа, в которой удобно и оперативно могут быть учтены многочисленные текущие изменения в экономике, связанные с проводимыми реформами, поскольку этот показатель ежегодно согласуется с заказчиками.

Стоимость нормо-часа адекватно отражает также инфляцию и сама по себе может служить мерой инфляции.

Стоимость конструкторского нормо-часа определяется делением суммы себестоимости проектных работ и прибыли в тыс. руб. на полезный годовой фонд рабочего времени в тыс. нормочасах.

Себестоимость проектных работ определяется по формуле 1:

$$СБпр = ЗП + СС + М + НР + Пр, \quad (1)$$

где:

ЗП - расходы на оплату труда за год. Включается основная и дополнительная заработная плата. В основную заработную плату входят все выплаты за год по фонду заработной платы, исчисленные из тарифных ставок и окладов, стимулирующие и компенсирующие выплаты, премии в соответствии с действующими системами премирования. Дополнительная заработная плата включает оплату отпусков, вознаграждений за выслугу лет и т.п. С другой стороны, размеры расходов на оплату труда определяются фактическим объемом собственных работ по заключенным договорам;

СС - отчисления на социальное страхование;

М - стоимость материалов;

НР - накладные расходы определяются в соответствии со сметой накладных расходов, составленной в соответствии с действующими отраслевыми положениями, либо по проценту накладных расходов, определяемому отношением их абсолютной величины к сумме основной заработной платы за прошлый год;

Пр - Прочие расходы.

Нормативная продолжительность проектирования по этапу рассматривается как минимальная при полной обеспеченности трудовыми ресурсами по всем специализациям и отсутствии перерывов.

Самый важный компонент стоимости судна – стоимость материалов и оборудования. При оценке их стоимости верфи, как правило, руководствуются содержанием заказных ведомостей, разработанных КБ. В ряде случаев при постройке судов по коммерческим контрактам оценки стоимости заказных ведомостей дополнительно прорабатываются специалистами службы закупок верфи для уточнения оценок стоимости на основе своих сведений о конъюнктуре рынка и предварительных консультаций с поставщиками.

Второй важный компонент стоимости, на который сильней всего может влиять судостроительный завод – затраты на фонд заработной платы. Эта составляющая стоимости определяется на основании трудоёмкости постройки судов. Трудоёмкость постройки судов рассчитывается на трёх уровнях:

Уровень 1. Оценка трудоёмкости на ранних стадиях проектирования (например, эскизный проект). Данные о судне в этом случае имеют очень высокий уровень неопределённости. При этом трудоёмкость определяют на основании расчётной массы судна. Она вычисляется путём вычитания из водоизмещения судна порожнем массы запасов, экипажа, остатков жидкости в системах и т.д. Для каждого типа судов с помощью параметрических методов в зависимости от расчётной массы определяется норма затрат труда на одну тонну массы. Для этого используют уравнения регрессии, которые обычно заранее определяют на основании собранной статистики. Обычно такие уравнения близки в экспоненте с отрицательным показателем степени. Затем этот показатель умножается на расчётную массу судна и на так называемый «коэффициент серийности», значение которого определяется порядковым номером заказа в серии. Кроме этого, в зависимости от назначения судна и других факторов, эта оценка трудоёмкости может умножаться на специальные поправочные коэффициенты.

Уровень 2. Оценка плановой трудоёмкости судна на основе данных нагрузки масс, определённой для достаточно глубоко разработанного проекта (обычно это уровень технического проекта). При этом трудоёмкость судна рассматривается как сумма трудоёмкости нескольких видов производств.

Обычно рассматривают следующие виды трудоёмкости:

- изготовления деталей корпуса;
- сборочно-сварочных работы;
- корпусостроительные работы (формирование корпуса, сдача на конструктивность и испытания помещений, подготовка к спуску и спуск судна);
-изготовления и монтаж систем;
-монтаж оборудования;
-достроечные работы;
-работы по испытаниям и сдаче судна.

По каждому из перечисленных видов работ используется методика, аналогичная описанной ранее. При этом для корпусных видов работ расчёт выполняется на основании массы металлического корпуса, для работ по изготовлению и монтажу систем – на основании массы трубопроводов систем, а для работ по монтажу оборудования – на основании массы механизмов и оборудования. Для достроечных работ и испытаний в качестве определяющей массы используют показатель, аналогичный расчётной массе, упомянутой в п.1.

Полученные описанным выше образом показатели трудоёмкости в расчёте на одну тонну массы умножаются на расчётную для каждого вида работ массу – так определяется трудоёмкость вида работ применительно к серийному заказу. Оценки трудоёмкости по перечисленным видам работ суммируются и к ним добавляется оценка трудоёмкости работ машиностроительной части. Она определяется на основании типового про-

цента трудоёмкости таких работ в трудоёмкости постройки судна, который также определяется по данным прототипов или экспертным путём.

Сумма трудоёмкости видов работ по постройке судна умножается на «коэффициент серийности», значение которого определяется порядковым номером заказа в серии. Эта оценка трудоёмкости может умножаться на специальные поправочные коэффициенты.

Определение трудозатрат на изготовление специальной судостроительной и разовой оснастки определяются с помощью аналогичной методики.

Расчёты трудоёмкости выполняются КБ в составе материалов технического проекта и согласовываются предприятием-строителем.

В случае постройки судов на основе государственного заказа расчёт выполняется по отраслевым нормативам. Такие нормативы могут использовать и при постройке судов на основе коммерческих контрактов. При этом расчёты по нормативам используются для получения «ориентира трудоёмкости».

В современных условиях, когда для верфи существует необходимость выиграть тендер или убедить заказчика в своих преимуществах перед конкурентами, ценной оказывается возможность использования собственных нормативов, которые предприятия разрабатывают на основе данных о постройке судов-прототипов. Порядок работы с ними кратко описан выше. При этом в отличие от отраслевых норм перечень видов работ на разных предприятиях может несколько отличаться. Внутренние нормы предприятий могут разрабатываться на основании накопленной статистики с помощью упрощённых методов регрессионного анализа, но в ряде случаев их даже используют, как «достигнутые показатели», на основании которых оценивают трудоёмкость предполагаемых к постройке заказов. В обоснованных случаях на основании экспертных оценок к «достигнутым показателям» применяют так называемые «коэффициенты сложности» для учёта индивидуальных особенностей разных заказов.

Уровень 3. Расчёт трудоёмкости работ по отдельным нарядам на выполнение работ, на основании которых часто начисляется заработная плата. Для выполнения этих работ до 1991 года в отрасли поддерживалась система норм времени [3]. Как правило, этот уровень нормирования затрат труда используется только для распределения затрат труда между отдельными рабочими и обычно прямо не влияет на общую трудоёмкость постройки судна. В современных условиях разработанные ранее отраслевые нормы времени практически не сопровождаются централизованно и это привело к тому, что на ряде предприятий эти нормы стали усовершенствовать, упрощать и заменять собственными нормами.

Кроме того, в цену заказа включаются накладные расходы предприятий. Накладные расходы управляются хуже прямых и, в этой ситуации, может быть полезен такой инструмент, как управление портфелями проектов.

Анализ сметного расчета

При анализе сметного расчета осуществляется проверка калькуляционных статей расходов в соответствии с Инструкцией по планированию, учету и калькулированию себестоимости продукции (работ, услуг) на предприятиях судостроительной отрасли РФ (ЦНИИ «Румб») и Отраслевой инструкцией по планированию, учету и калькулированию себестоимости продукции (работ, услуг) на промышленных предприятиях речного транспорта (утв. Минтрансом России 26.07.1994) № ВА-6/256.

Коэффициенты, определяющие повышенные нормативы материальных и трудовых затрат, учитывающих освоение строительства головного и серийного судов принимаются в соответствии с Нормативами трудоемкости и продолжительности проектирования гражданских судов № 299024-03-Н-91, ЦНИИ «Румб» и Трудоемкостью постройки судов. Нормативы. РД5Р.ГКЛИ.0502-184-94, ЦНИИ технологии судостроения.

Ценообразующие нормативы при выполнении расчета могут приниматься исходя из данных определенной судостроительной верфи или согласно государственным и отраслевым нормативным документам.

Основными ценообразующими нормативами на судостроительном предприятии являются:

- средняя часовая тарифная ставка основных производственных рабочих;
- начисления на заработную плату и отчисления на социальные нужды;
- накладные (общезаводские и цеховые) расходы;
- плановые накопления;
- транспортно-заготовительные расходы.

Расчет средней часовой тарифной ставки может быть выполнен исходя из среднемесячной начисленной заработной платы (без выплат социального характера) по видам экономической деятельности («производство транспортных средств и оборудования») в соответствии с информацией, полученной с сайта федеральной службы государственной статистики по ссылке ttp://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/wages.

Расчет начислений на заработную плату. На данную статью относятся обязательные отчисления по установленным законодательством нормам (органам государственного социального страхования, Пенсионному фонду, в государственный фонд занятости и медицинского страхования). (ФЗ от 15.12.2001г №167-ФЗ «Об обязательном пенсионном страховании в Российской Федерации (в редакции ФЗ от 03.12.2011 г. №379-ФЗ); ФЗ от 03.12.2012 г. №228-ФЗ «О страховых тарифах на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и

профессиональных заболеваний на 2013 г. и на плановый период 2014 и 2015 г.г).

Величина накладных (общезаводских и цеховых) расходов по каждому предприятию рассчитывается с использованием соответствующего норматива техпромфинплана текущего года в процентном отношении к основной заработной плате производственных рабочих. Норматив накладных расходов на судостроительных предприятиях отрасли в 2014 г. находится в интервале от 300 до 400%.

Расчет величины плановых накоплений. Норматив плановых накоплений (уровень рентабельности) на судостроительных предприятиях составляет 10-25%.

Среднестатистическая величина транспортно-заготовительных расходов для судостроительных предприятий центральных регионов Российской Федерации составляет 10%. При выполнении сметного расчета используется расчетное соотношение ценообразующих нормативов (табл.1)

Таблица 1

Расчетное соотношение ценообразующих нормативов

№ п/п	Наименование показателя	Расчетная величина
1	Транспортно-заготовительные расходы	% от материальных затрат
2	Средняя часовая ставка, руб.	
3	Доплата по районному коэффициенту	% от основной заработной платы (ОЗП)
4	Доплата по прогрессивно-премиальным системам оплаты труда	% от ОЗП + п.3
5	Дополнительная заработная плата	% от ОЗП + п.3+п.4
6	Начисления на заработную плату	% от ОЗП + п.3+п.4+п.5
7	Общепроизводственные расходы	% от ОЗП
8	Накладные расходы	% от ОЗП
9	Оснастка	% от себестоимости
10	Неучтенные расходы	% от себестоимости
11	Плановые накопления	% от себестоимости + неучтенные расходы

:

Выполненный расчет трудоемкости проверяется в соответствии нормативными документами [17,19]. Нормативы используются [19] на предмет:

- выбор типа судна;
- расчет по норме удельной трудоемкости постройки (в случае морских судов).

Анализ затрат на материалы и оборудование проводится техническими специалистами на предмет соответствия рассматриваемому проекту судна и адекватных объемов закупаемых материалов. Основные стоимостные объемы (металлические материалы, энергетический и движительный комплексы, грузовое оборудование и т.д.) анализируются специалистами на основании имеемой информации от прямых поставщиков, прошлых сметных расчетов, заводских ведомостей.

Экспертное заключение по стоимости строительства судна

При разработке экспертного заключения по стоимости строительства судна специалистами выполняются расчеты, например, по «Программе расчета стоимости проектируемых и строящихся морских транспортных судов, судов активного ледового плавания и ледоколов, других типов судов на отечественных и зарубежных верфях», ЯКУТ 47-018-02, ЦНИИМФ, 2002 г. (далее, «Программа расчета стоимости») [20].

«Программа расчета стоимости» разработана на базе нормативных и калькуляционных материалов по стоимости строительства судов в СССР и в России до 2002 года, а также по информации иностранной периодической печати 1970 - 2015 г.г. Программа ежегодно дополняется новыми техническими данными по построенным и планируемым к строительству судам.

«Программа расчета стоимости судов» базируется на параметрическом методе расчета цены судна – методе регрессивно-корреляционного анализа, в котором в виде формул и графиков представлены зависимости цены от массы металлических конструкций, мощности главной и вспомогательной энергетических установок, основных конструктивных элементов судна.

Для определения стоимости нового судна необходимо иметь судно-аналог, близкое по размерениям и техническим характеристикам с рассчитываемым, а также наличие нагрузки масс конструктивных элементов по форме [21] или [22] и массы порожнем судна-аналога.

Все расчеты выполняются в долларах США с пересчетом на рубли по принятому курсу на момент строительства судна.

Для проверки расчетных результатов по «Программе расчета стоимости» выполняется сравнительная оценка строительной стоимости методом пересчета с судов-аналогов. Данная информация не отражается в заключении, а выполняется только для подтверждения актуальности программы на момент расчета.

Для проведения проверки собирается информация по ценам строительства судов того же типа, что и рассчитываемое (основные источники: Судоходство и судостроение (статистика, экономика, цены). ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Выпуски за 2006-2013 г.г.; открытые информационные источники интернета, результаты прошлых расчетов ЦНИИМФ).

Цены строительства судов-аналогов приводятся к году постройки рассчитываемого судна с

учетом инфляции по годам (дефляторы и индексы цен производителей по видам экономической деятельности, прогноз Минэкономразвития).

Определяются подходящие единицы сравнения по типу рассчитываемого судна. Единицами сравнения могут быть приняты стоимости:
Для универсальных грузовых судов:
1 т грузоподъемности;
1 т дедвейта;
1 т рег. вместимости;
1 т полного водоизмещения;
1 т всего судна.
Для специализированных судов:
1 т грузоподъемности;
контейнеровместимость;
пассажировместимость;
1 т полного водоизмещения;
1 т всего судна.
Для буксиров, ледоколов, служебно-вспомогательных, судов технического флота и самоходных плавучих технических средств:
1 производительности;
1 т водоизмещения;
1 мощности ГЭУ;
1 т всего судна.

Полученная средняя стоимость выбранной единицы сравнения используется для определения стоимости рассчитываемого судна на основе судов-аналогов.

Выводы

По итогам анализа нормативно-методических документов, используемых в практике судостроительными предприятиями при определении цен и затрат по калькуляционным статьям на морскую технику следует констатировать тот факт, что ***большинство документов устарели*** (1977-2003 гг.), их использование затрудняет проведение достоверных расчетов в актуальной ситуации.

Для получения актуальной информации по индексам-дефляторам и оценке стоимости постройки новых судов используются интернет-источники.

Анализ сложившейся ситуации показал существующую ***разобщенность в информационном обмене*** конструкторских организаций и судостроительного производства.

Обобщение сведений, полученных по результатам анализа повседневной практики применения нормативно-методических документов на судостроительных предприятиях, позволило заключить, что ***преимущественно используются три метода*** определения затрат: нормативный (по трудоёмкости с последующей калькуляцией), параметрический и сравнительный.

На основании обобщения вышеозначенной практики применения нормативно-правовой базы в сфере ценообразования на морскую технику были разработаны предложения по порядку и методике определения затрат по отдельным калькуляционным статьям на морскую технику на стадиях её проектирования и строительства.

При разработке проекта отраслевой методики определения цен и затрат по калькуляционным статьям необходимо решить следующие задачи:
-предусмотреть возможность представления укрупненных расчетов, в частности, с использованием изделий-аналогов;
-оптимизировать объем и структуры представляемых данных;
-разработать методы расчета прогнозных цен;
-разработать систему контроля за уровнем и обоснованностью цен и затрат на всех стадиях жизненного цикла продукции;
-ввести специализированные индексы-дефляторы;
-активизировать направление совершенствования подготовки отраслевых специалистов.

Идеологически предприятия ОСК должны работать в едином информационном пространстве, где существуют единые справочники, номенклатуры изделий, таблицы профессий, типовые работы и т. д.

Создание единого информационного пространства позволило бы ОСК видеть и контролировать работу предприятий отрасли в режиме реального времени и своевременно принимать необходимые управленческие решения.

Целесообразно предложить ряд следующих мер, направленных на корректировку существующих негативных тенденций, например:
- внедрение в отрасли принципов проектного управления на основе контрактов типа EPM или EPCM;
- реализация принципов управления жизненным циклом PLM в их современном понимании;
- полезен на уровне управленческого учета переход к применению стандартной структуры затрат SFI на всех предприятиях;
- формирование и внедрение в повседневную практику судостроительных предприятий «***Концепции стоимостного инжиниринга***».

Для решения подобного комплекса задач необходимо обеспечить взаимодействие и координацию между судостроительными предприятиями, ЦНИИ, КБ и другими учреждениями, работающими в этой области, а также Федеральной службой государственной статистики и Департаментом судостроительной промышленности и морской техники при Минпромторге России.

Авторы благодарят сотрудников АО ЦНИИТС, ООО «ЦИТ «МЁБИУС», АО «ЦНИИМФ», АО «Адмиралтейские верфи», ОАО «ЦКБ «Айсберг», ФГУП «Крыловский государственный научный центр», принимавших непосредственное участие в проводимом исследовании.

Литература:

1. Протокол отраслевого совещания специалистов проектных организаций, судостроительных и
2. судоремонтных предприятий по теме: «О принятии мер по улучшению ценообразования и расчётов
3. трудоёмкости на продукцию судостроения». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: http://www.sstc.spb.ru/news/protokol-of-specialists.pdf. (дата обращения 22.03.2016)
4. Гинзбург А.И., Матвеева О.К. Экономическое обоснование проекта судна: Методические указания к дипломному проектированию. СПб.: СПбГМТУ, 2008. 44 с.
5. Голота Г.Ф. Техническое нормирование судо-корпусных и судомонтажных работ. 3-е издание. Л.:
6. Судостроение, 1987. 128 с.
7. Горелова М.Ю. Управленческий учет. Методы калькулирования себестоимости. М.: НалогИнформ, Статус-Кво 97, 2006. 32 с.
8. Грицан А.Б. Методы инженерно-экономического анализа в ценообразовании на суда и плавсредства. Ч I. Производительность, конкурентоспособность и тенденции в отечественном и мировом
9. судостроении. СПб.: «Бостон-спектр», 2004. 492 с.
10. Есипов В.Е. Цены и ценообразование: Учебник для вузов. 4-е изд. СПб: Питер, 2006. 560 с.
11. Иконников А.Ф. Определение стоимости морских судов с учетом новых технических требований. //Вопросы оценки. Российское общество оценщиков. -№2 , 2001. С.26-30.
12. Иконников А.Ф. Оценка стоимости судов. Часть 1. Затратный подход./ А.Ф. Иконников, Е.В. Маслюк. Учебное пособие. Калининград: БИЭФ, 2004. 95 с.
13. Иконников А.Ф., Маслюк Е.В. Оценка стоимости судов: Учебное пособие. Калининград: БИЭФ, 2004. 107 с.
14. Инструкция по планированию, учету и калькулированию себестоимости продукции (работ, услуг) на предприятиях отрасли. Утверждена приказом первого заместителя МСП 15.11.91 №391. СПб.: ЦНИИ «Румб», 1991. 212 с.
15. Кораблева М. С. Методология оценки стоимости работ по проектированию средств
16. океанотехники.//Диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук по специальности 08.00.05. СПб.: СПбГМТУ, 2014. 167 с.
17. Краев В.И. Экономические обоснования при проектировании морских судов. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1981. 280 с.
18. Краев В.И., Ступин О.К., Лимонов З.Л. Экономическое обоснование при проектировании морских
19. грузовых судов: монография. Л.: Судостроение, 1973. 290 с.
20. Маслюк Е.В. Проектирование морских судов. Расчеты нагрузки масс водоизмещения порожнем судов различного назначения: Учебное пособие./ Е.В. Маслюк, А.Ф. Иконников. Калининград: Изд-во ФГОУ ВПО «КГТУ», 2008. 47 с.
21. Маслюк Е.В. Оценка машин, оборудования и транспортных средств: Учебное пособие. Калининград: БИЭФ, 2004. 80 с.
22. Мацкевич В.А., Осипенко В.П., Петров Н.И.. Об оценке и прогнозировании трудоемкости работ в
23. проектно-конструкторских бюро судостроительного профиля.// Морской вестник 2010. – №2. С. 111–114.
24. Нормативы трудоемкости и продолжительности проектирования гражданских судов. № 299024-03-Н-91./ Вед. научн. сотр., к.т.н. М.М. Меленевский, научн. сотр., к.э.н. Л.Л. Истратова. СПб.: ЦНИИ «Румб», 1991. 48 с.
25. Общероссийский классификатор продукции. ОК 005-93. Утв. Постановлением Госстандарта России от 30.12.1993 N 301) (ред. от 22.10.2014) (дата введения 01.07.1994) (коды 01 0000 - 51 7800). STANDARD.RU - портал о стандартах. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: http://www.standard.ru/classif/okp/okp-62.phtml; http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_12618/.(дата обращения 22.03.2016).
26. Трудоемкость постройки судов. Нормативы РД5Р.ГКЛИ.0502-184-94. Руководящий доку-мент. СПб.: ЦНИИ ТС, 1994. 81 с.
27. Методика автоматизированного расчета стоимости проектируемых и строящихся морских транспортных судов, судов активного ледового плавания и ледоколов, судов рыболовного флота на отечественных и зарубежных верфях с использованием АС ^{оптим}Цена (соответствует отраслевой методике расчета стоимости проек. проектируемых и строящихся транспортных судов различных типов на отечественных или зарубежных верфях в свободно-конвертируемой валюте. ЦНИИМФ ЯКУТ 47-018-02). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: http://www.proa.ru/price/methods.htm. (дата обращения 22.03.2016)
28. Нагрузка масс гражданских вспомогательных судов. Коды и элементы нагрузки. Отраслевой стандарт. РД 5.0206-76. Вступил в действие с 01.07.77. Изменения: 1/82, 2/84. М.: НИИ стандартизации и сертификации. 82 с.
29. Нагрузка масс гражданских и вспомогательных судов. Классификация элементов нагрузки. ОСТ5Р.0206-2002. Стандарт отрасли. СПб.: НИИ «Лот» ФГУП «ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова», 2003. 78 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: http://lab-sapr.ru/ost/5r_0206-2002.pdf. (дата обращения 22.03.2016)

References:

1. *Protokol otraslevogo soveshaniya specialistov proektnyh organizacii, sudostroitel'nyh i sudoremontnyh predpriyatii po teme: «O prinyatii mer po uluchsheniyu cenoobrazovaniya i raschetov trudoemkosti na produkciyu sudostroeniya»*. [Minutes of the meeting industry professionals design companies, shipbuilding and ship repair companies on the topic: "On measures to improve the pricing and settlement in the labor intensity of shipbuilding products"]. URL: http://www.sstc.spb.ru/news/protokol-of-specialists.pdf. (Reference date 22/03/2016). (In Russian).
2. Ginzburg A.I., Matveeva O.K. *Ekonomicheskoe obosnovanie proekta sudna: Metodicheskie ukazaniya k diplomnomu proektirovaniyu*. [Economic vessel of the project: Guidelines for degree designing]. St. Petersburg: SPbGMTU Publ, 2008. 44 p. (In Russian).
3. Golota G.F. *Tehnicheskoe normirovanie sudokorpusnyh i sudomontazhnyh rabot*. [Technical regulation of hull and sudomontazhnyh works]. *3-e izdanie*. Leningrad: *Sudostroenie* Publ, 1987. 128 p (In Russian).
4. Gorelova M.Yu. *Upravlencheskii uchet. Metody kal'kulirovaniya sebestoimosti*. [Management Accounting. Methods of calculation of the cost]. Moscow: NalogInform, Status-Kvo 97 Publ, 2006. 32 p. (In Russian).
5. Grican A.B. *Metody inzhenerno-ekonomicheskogo analiza v cenoobrazovanii na suda i plavsredstva. Ch I. Proizvoditel'nost', konkurentosposobnost' i tendencii v otechestvennom i mirovom sudostroenii.* [Methods of engineering-economic analysis in the pricing of ships and boats. W I. Productivity, competitiveness and trends in the domestic and world shipbuilding]. St. Petersburg: «Boston-spektr Publ», 2004. 492 p. (In Russian).
6. Esipov V.E. *Ceny i cenoobrazovanie: Uchebnik dlya vuzov.* [Prices and pricing: A Textbook for high schools]. 4-e izd. St. Petersburg: Piter Publ, 2006. 560 p. (In Russian).
7. Ikonnikov A.F. *Opredelenie stoimosti morskih sudov s uchetom novyh tehnicheskih trebovanii*. [Valuation of ships with the new technical requirements]. *Voprosy ocenki. Rossiiskoe obshestvo ocenshikov*. [Evaluation. Russian Society of Appraisers]. -№2 , 2001. PP.26-30. (In Russian).
8. Ikonnikov A.F. *Ocenka stoimosti sudov. Chast' 1. Zatratnyi podhod: Uchebnoe posobie*. [Valuation of ships. Part 1. Cost Approach]. Kaliningrad: BIEF Publ, 2004. 95p. (In Russian).
9. Ikonnikov A.F., Maslyuk E.V. *Ocenka stoimosti sudov: Uchebnoe posobie.* [Valuation of vessels: Textbook]. Kaliningrad: BIEF Publ., 2004. 107 p. (In Russian).
10. *Instrukciya po planirovaniyu, uchetu i kal'kulirovaniyu sebestoimosti produkcii (rabot, uslug) na predpriyatiyah otrasli. Utverzhdena prikazom pervogo zamestitelya MSP 15.11.91 N391*. [Planning Guide, accounting and calculation of cost of goods (works, services) in the industry. Approved by the Order of the Deputy SME 15.11.91 №391]. St. Petersburg: CNII «Rumb» Publ, 1991. 212 p. (In Russian).
11. Korableva M. S. *Metodologiya ocenki stoimosti rabot po proektirovaniyu sredstv okeanotehniki.Dissertaciya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata ekonomicheskih nauk po special'nosti 08.00.05.* [Methodology for valuation of works on designing ocean technology tools. Thesis for scientific degree of candidate of economic sciences on specialty 08.00.05]. St. Petersburg: SPbGMTU Publ, 2014. 167 p. (In Russian).
12. Kraev V.I. *Ekonomicheskie obosnovaniya pri proektirovanii morskih sudov*. [The economic rationale for the design of ships]. 2-e izd., pererab. i dop. Leningrad: Sudostroenie Publ, 1981. 280 p. (In Russian).
13. Kraev V.I., Stupin O.K., Limonov Z.L. *Ekonomicheskoe obosnovanie pri proektirovanii morskih gruzovyh sudov: monografiya*. [The economic rationale for the design of marine cargo ships: a monograph]. Leningrad: Sudostroenie Publ, 1973. 290 p. (In Russian).
14. Maslyuk E.V. *Proektirovanie morskih sudov. Raschety nagruzki mass vodoizmesheniya porozhnem sudov razlichnogo naznacheniya: Uchebnoe posobie*. [Designing ships. Calculations load mass displacement empty vessels for various purposes: Textbook]. Kaliningrad: Izd-vo FGOU VPO «KGTU» Publ, 2008. 47 p. (In Russian).
15. Maslyuk E.V. *Ocenka mashin, oborudovaniya i transportnyh sredstv: Uchebnoe posobie*. [Evaluation of machines, equipment and vehicles: Textbook]. Kaliningrad: BIEF Publ, 2004. 80 p. (In Russian).
16. Mackevich V.A., Osipenko V.P., Petrov N.I.. *Ob ocenke i prognozirovanii trudoemkosti rabot v proektno-konstruktorskih byuro sudostroitel'nogo profilya*. [On the estimation and forecasting of labor intensity in the engineering design of the shipbuilding Bureau Profile]. Morskoi vestnik. [Maritime Gazette]. 2010. □ N2. PP. 111-114. (In Russian).
17. *Normativy trudoemkosti i prodolzhitel'nosti proektirovaniya grazhdanskih sudov. ¹ 299024-03-N-91.Ved. nauchn. sotr., k.t.n. M.M. Melenevskii, nauchn. sotr., k.e.n. L.L. Istratova*. [Norms of the complexity and duration of the design of the civil courts. № 299024-03-H-91]. St. Petersburg: CNII «Rumb» Publ, 1991. 48 p. (In Russian).
18. *Obsherossiiskii klassifikator produkcii. OK 005-93. Utv. Postanovleniem Gosstandarta Rossii ot 30.12.1993 N 301) (red. ot 22.10.2014) (data vvedeniya 01.07.1994) (kody 01 0000 - 51 7800).* [National Classification of products. OK 005-93. Approved. Resolution of the State Standard of Russia from 30.12.1993 N 301) (amended on 10.22.2014) (the date of introduction of 01.07.1994) (code 01 0000 -. 51 7800)]. STANDARD.RU - portal o standartah. [STANDARD.RU - Portal Standards]. URL: http://www.standard.ru/classif/okp/okp-62.phtml; http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_12618/.(Reference date 22/03/2016). (In Russian).
19. *Trudoemkost' postroiki sudov. Normativy RD5R.GKLI.0502-184-94. Rukovodyashii dokument*. [The complexity of the construction of ships. Standards RD5R.GKLI.0502-184-94. Guidance document]. St. Petersburg: CNII TS Publ, 1994. 81 p. (In Russian).

20. *Metodika avtomatizirovannogo rascheta stoimosti proektiruemyh i stroyashihsya morskih transportnyh sudov, sudov aktivnogo ledovogo plavaniya i ledokolov, sudov rybolovnogo flota na otechestvennyh i zarubezhnyh verfyah s ispol'zovaniem AS ^{optim}Cena (sootvetstvuet otraslevoi metodike rascheta stoimosti proektiruemyh i stroyashihsya transportnyh sudov razlichnyh tipov na otechestvennyh ili zarubezhnyh verfyah v svobodno-konvertiruemoi valyute. CNIIMF YaKUT 47-018-02).* [The methodology of the automated calculation of the cost of the designed and constructed of marine transport vessels, vessels active ice navigation and icebreakers, fishing fleet vessels on domestic and foreign shipyards using AC^{optim} Price (corresponding sectoral method of calculating the cost of the designed and constructed various types of cargo vessels in domestic or foreign shipyards in freely-convertible currency. CNIIMF YAKUT 47-018-02]. URL: http://www.proa.ru/price/methods.htm. (Reference date 22/03/2016). (In Russian).
21. *Nagruzka mass grazhdanskih vspomogatel'nyh sudov. Kody i elementy nagruzki. Otraslevoi standart. RD 5.0206-76. Vstupil v deistvie s 01.07.77. Izmeneniya: 1/82, 2/84.* [Load mass civilian support ships. Codes and load cells. Industry Standard. RD 5.0206-76. It entered into force on 07.01.77. Changes: 1/82, 2/84]. Moscow: *NII standartizacii i sertifikacii Pub*l, 82 p. (In Russian).
22. *Nagruzka mass grazhdanskih i vspomogatel'nyh sudov. Klassifikaciya elementov nagruzki. OST5R.0206-2002. Standart otrasli.* [Load mass civilian and auxiliary vessels. Classification of load cells. OST5R.0206-2002. industry Standard]. St. Petersburg: *NII «Lot» FGUP «CNII im. akad. A. N. Krylova»*. [SRI "Lot" FSUE «Krylov Shipbuilding Research Institute. Acad. Krylov " Publ.], 2003. 78 p. URL: http://lab-sapr.ru/ost/5r_0206-2002.pdf. (Reference date 22/03/2016). (In Russian).

Научный журнал
МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
190121 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3
e-mail: mit-journal@mail.ru www.morintex.ru

Информация для авторов научного журнала "МОРские ИНтеллектуальные ТЕХнологии"

Для публикации статьи необходимо представление перечисленных ниже документов.

1. Сопроводительное письмо авторов
2. Электронная версия статьи, подготовленная в соответствии с требованиями к оформлению статей – инструкция прилагается ниже
3. Одна рецензия на публикуемую статью по соответствующей специальности с подписью, заверенной гербовой печатью. При междисциплинарном исследовании предоставляются две рецензии от экспертов различных областей наук по соответствующей тематике.
4. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
5. Лицензионный договор

Перечисленные документы (кроме акта экспертизы) могут быть переданы в редакцию по электронной почте по адресу **mit-journal@mail.ru** (по этому же адресу осуществляется текущая переписка с редакцией).

По желанию авторов, документ 1 в бумажной версии и компакт-диск с документами 2 и 3 могут быть либо присланы по почте в адрес редакции, либо доставлены непосредственно в редакцию, либо переданы одному из членов редколлегии. Оригинал акта экспертизы должен быть либо прислан по почте в адрес редакции, либо доставлен непосредственно в редакцию, либо переданы одному из членов редколлегии.

На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

Каждая статья, принятая редколлегией для рассмотрения, проходит также внутреннюю процедуру рецензирования. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации. Рецензентом может быть специалист по профилю статьи с ученой степенью не ниже кандидата наук.

Редколлегия не вступает с авторами в обсуждение соответствия их статей тематике журнала.

Журнал публикуется в цветном варианте.

Плата с аспиранта в случае, если он является единственным автором, за публикацию статьи не взимается.

Стоимость публикации 8500 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"

Никитин Николай Васильевич
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования судов
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: morintex_spb@mail.ru

Аннотация

В работе предлагаются правила оформления статей для научного журнала «Морские интеллектуальные технологии» в текстовом процессоре MS Word 97-2003 по требованиям для публикации в научном журнале ВАК, а также международных реферативных баз данных Scopus и Web of Science. Инструкция представляет собой специальную заготовку, которая служит базисом для создания конкретной статьи.

Аннотация предоставляется авторами в расширенном виде. Объем: не менее 950 и не более 1800 знаков (с пробелами), то есть 100-250 слов. В аннотации должны быть четко определены цель работы, ее новизна, представлены основные выводы. Языки – русский и английский.

Типичная структура аннотации: состояние вопроса; материалы и/или методы исследования, результаты; заключение.

Методы в аннотации только называются. Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом 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
e-mail: morintex_spb @mail.ru

Abstract

The paper suggests rules for formatting articles to be submitted for the “Maritime Smart Technologies” academic periodical in the MS Word Processor 97-2003 according to the requirements set out for publication in an academic periodical of the State Commission for Academic Degrees and Titles as well as in the international Scopus and Web of Science bibliographic databases. The guidelines represent a special template which serves as a basis for creation of a certain article.

The authors should submit an extended abstract. The abstract should contain minimum 950 and maximum 1800 characters (including spaces), i. e. 100–250 words. The abstract must cover the objective and novelty of the paper and reflect the main conclusions. The languages of the abstract should be Russian and English.

The standard structure of an abstract is as follows: the state-of-the-art summary; data for study and/or research techniques; findings; conclusion.

The techniques should only be mentioned in the abstract. The findings should be described as accurately and informatively as possible. The major theoretical and experimental results, actual data, discovered interrelations and common factors should be reflected. Still new results and conclusions which, from the author’s point of view, are of practical importance are put above. The data accuracy and reliability limits as well as the degree of their verification should be indicated. The conclusions can be accompanied by recommendations, estimations, suggestions described in the article.

Key words: The list of key words must be specific for the subject field of the investigation. General terms (e. g. problem, solution) which are not specific for this publication are inadmissible. The key words should amount to 8–1.

Введение

При подготовке статей у авторов нередко возникают трудности, связанные с необходимостью жестко выдерживать требуемые форматы подготовки текстов.

Вместе с тем, в современных текстовых процессорах существуют развитые средства поддержки общезначимых и специализированных шаблонов, автоматизирующих эту деятельность. Учитывая вышесказанное, автор данной инструкции подготовил специализированный шаблон создания camera ready текстов статей, представляемых в редакцию.

Данная инструкция не обычный текст, а заготовка, которую авторы работ, представляемых в журнал, должны редактировать для получения качественных текстов статей.

Обращаясь к авторам, редакция журнала доводит до их сведения требования к оформлению статей. Суть их сводится к тому, что, с одной стороны, предоставленная авторами информация должна быть интересной и понятной международному научному сообществу без обращения к полному тексту статьи. а с другой – должны быть обеспечены возможности контекстного поиска и аналитической обработки данных.

Фамилии авторов должны быть транслитерированы, или указаны так же, как в ранее опубликованных в зарубежных журналах статьях. Должны быть представлены адресные сведения о месте работы авторов, должность, ученая степень и ученое звание.

Название организации переводится на английский язык без составных частей названий организаций, обозначающих принадлежность ведомству, форму собственности, статус организации с указанием полного юридического адреса в следующей последовательности: улица, дом, город, индекс, страна. Наиболее полный список названий учреждений и их официальной англоязычной версии можно найти на сайте НЭБ eLibrary.ru. Название статьи, ключевые слова и аннотация также переводятся на английский язык. Все переводы должны быть высококачественными.

Название статьи должно быть информативным, можно использовать только общепринятые в международном научном общении сокращения. В переводе названия 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 общепринятому шаблону и содержать разделы: введение (актуальность), цель и задачи, материалы и методы, результаты, выводы, обсуждение (дискуссия).

1. Инсталляция заготовки Mor-Inst

Вы получили по электронной почте (или некоторым другим способом) файл **Mor-Inst.doc** и должны использовать его на своем текстовом процессоре MS Word 97-2003.

Для того, чтобы начать работу необходимо: **скопировать** на Ваш компьютер файл **Mor-Inst.doc**, переименовав его под фамилией первого автора (например, **nikitin.doc**).

После выполнения этих действий Ваш текстовый процессор MS Word 97-2003 готов для создания документа в формате camera ready для оформления номера.

2. Начало работы с заготовкой Mor-Inst

Итак, предположим, что Вы скопировали заготовку **Mor-Inst.doc** для своего текстового процессора MS Word 97-2003, как это определено в предыдущем разделе данной инструкции.

Теперь, после вызова текстового процессора MS Word 97-2003 , из опции основного меню **File (Файл)** выбирайте подопцию **Open (Открыть)**, а

на приглашение выбрать файл отметьте **nikitin.doc** и нажмите клавишу **OK**.

После этого Ваш текстовый процессор 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

3.1. Общие замечания по объему и формату статьи

По решению редакции объемы принимаемых к публикации материалов должны отвечать следующим ограничениям

- объем статьи должен быть не более 5 стр.;
- текст доклада должен укладываться в целое число страниц.

Все материалы должны быть сформатированы для последующей печати на стандартных листах формата А4 со следующим Layout (Параметрами страницы) (рис. 1).

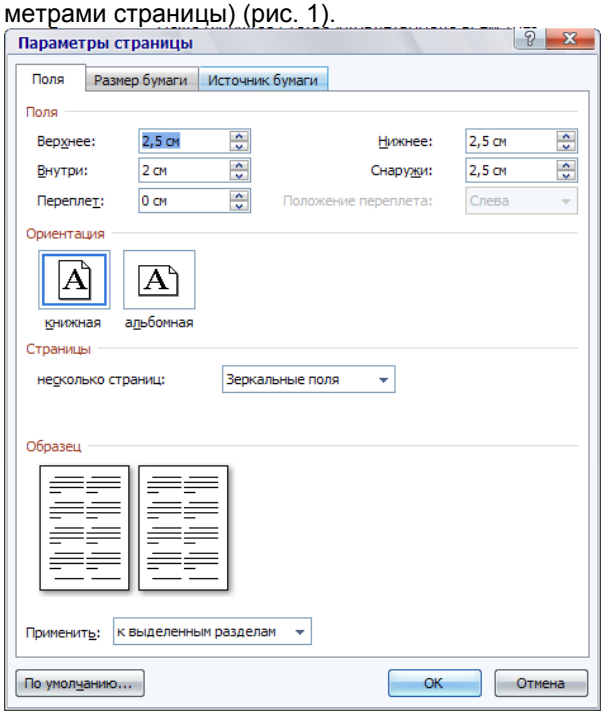


Рис. 1. Общий Layout страницы

Основной текст набирается в 2 колонки, промежуток между колонками 0,7 мм; ширина колонки 7,9 мм.

Нумерация страниц подготавливаемой работы не производится.

Каждая статья должна быть организована следующим образом (данный sampler сам является примером нужной организации текста статьи)

– УДК..
– Заголовок работы.
– Для каждого автора статье:

Фамилия Имя Отчество
ученое звание, ученая степень,
должность
Место работы
Адрес работы (или проживания для неработающих)
E-mail

Все кеглем 9 все в именительном падеже

– Если авторов несколько, их фамилии упорядочиваются по алфавиту.

– Аннотация работы (не менее 950 и не более 1800 знаков (с пробелами), то есть 100-250 слов).

– Ключевые слова (8-10).

– Разделы и подразделы основного текста (нумерация сквозная арабскими цифрами у разделов и номер раздела + нумерация сквозная арабскими цифрами у данного подраздела; номер раздела и номер подраздела отделяются друг от друга точкой; после номера раздела (подраздела) ставится точка, а название раздела (подраздела) начинается с заглавной буквы, после заголовков точка не ставится).

– В конце работы (перед списком литературы) может быть 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.

3.3. Шрифты, используемые при подготовке статьи

Все шрифты, используемые при подготовке статьи, выбираются из набора ***Arial.*** Если Вы пользуетесь данным sampler’ом, все размеры будут выставлены правильно и Вам останется только следовать им. Если же Вы пользуетесь

твердой копией данного sampler'а, то используйте следующие размеры шрифтов:

- для названия статьи ***Arial 13 прописной, жирный;***
- для УДК и идентификации автора (ов) статьи ***Arial 9 курсив;***
- для адреса (ов) автора (ов) статьи ***Arial 11;***
- для аннотации ***Arial 9, границы текста +10 мм слева и -10 мм справа;***
- для текста статьи ***Arial 9,5, абзацный отступ 5 мм;***
- для списка литературы ***Arial 10,5, жирный, по центру, интервал сверху 12 пт, снизу 4 пт, абзацный отступ 0;***
- для заголовков разделов статьи ***Arial 10,5, жирный по центру, интервал сверху 12 пт, снизу 4 пт, абзацный отступ 0;***
- для заголовков подразделов статьи ***Arial 9,5, курсив по центру, интервал сверху 12 пт, снизу 4 пт, абзацный отступ 0;***
- для подрисуночных подписей ***Arial 8,5, курсив, по центру, интервал сверху 4 пт, снизу 9,5 пт, абзацный отступ 0;***
- для подстраничных ссылок ***Arial 8,5, абзацный отступ 0,5.***

4.3. Использование графического материала

В работе допускается использование рисунков, схем, экранных форм и др. графических материалов (обратите внимание на то, чтобы рисунки сохранялись как **цветные** или **черно-белые картинки**) как **внедренных объектов**[1]. Каждое графическое изображение должно представлять собой единый, цельный объект.

По возможности используйте для графического материала минимально требуемое разрешение. Это существенно уменьшает объем пересылаемого материала.

Во всех случаях обращайте внимание на то, чтобы текстовые подписи на рисунках были набраны с использованием тех же шрифтов, что и основной текст и меньшим размером.

3.2. Использование таблиц

В работе допускается использование таблиц, подготовленных стандартными средствами MS Word 97-2003 . В качестве примера ниже дается представление таблицы, подготовленной с помощью этих средств (табл. 1).

Таблица набирается меньшим кеглем.

Слово таблица ***Arial 8,5, курсив, вправо, абзацный отступ 0.***

Название таблицы ***Arial 8,5, жирный, по центру, интервал снизу 4 пт, абзацный отступ 0.***

Текст в таблице ***Arial 8,5.***

Таблица 1

Пример таблицы

N/N	Колонка-1	Колонка-2	Колонка-3	Колонка-4	Колонка-5
1.	ффффф	ыыыы	111	*Ммм*	**ттттт**
2.	ффффф	ыыыы	111	*Ммм*	**ттттт**
3.	ффффф	ыыыы	111	*Ммм*	**ттттт**
4.	ффффф	ыыыы	111	*Ммм*	**ттттт**

Перед и после таблицы одна пустая строка основного текста.

ФОРМУЛЫ И РИСУНКИ НЕ РАЗМЕЩАТЬ В ТАБЛИЦЕ!!!

3.4. Использование формул

В работе допускается использование формул любой сложности, поддерживаемых компонентой MS Equation.

Если формула появляется в тексте как отдельная строка, она должна быть центрирована и, при необходимости, помечена сквозной нумерацией арабскими цифрами в круглых скобках. Если формула появляется внутри текста, обращайте внимание на размеры используемых шрифтов, чтобы они были «состыкованы» с размерами текста работы.

Ниже приводятся примеры формул в тексте и в отдельной строке.

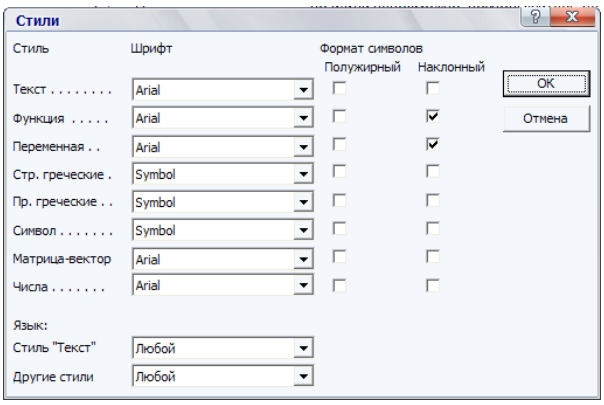
Данный пример иллюстрирует использование формулы в тексте $\sum_{n=1}^{n=K} X_n^k \cdot 1{,}25$. Здесь при подготовке формулы использованы установки шрифтов by default (по умолчанию). По возможности, пользуйтесь этим способом для подготовки не только формул в тексте статьи, но формул в отдельной строке (1).

$$\forall x \in [a,b] F(x) \le \varpi \qquad (1)$$

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.



[1] 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.

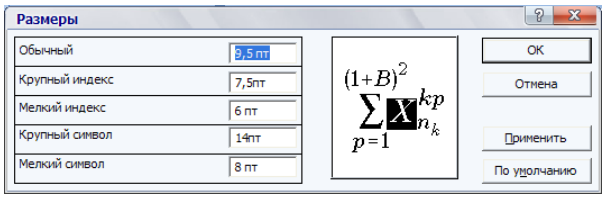


Рис. 2. Установки шрифтов и размеров в MS Equation

Обратите внимание на то, что при наборе формул в тексте, возможно изменение «интервальности». Не бойтесь этого и не пытайтесь уменьшить размер используемого шрифта до нечитаемого уровня. Аналогичное замечание справедливо и для формул, располагаемых в отдельной строке.

3.5. Размещение элементов текста на две колонки

Если *таблицы, формулы, рисунки* превышают размер одной колонки, то их размещают **на полный формат** (на 2 две колонки).

При этом сохраняются все требования по шрифтам и размерам к этим элементам, когда они набраны на формат одной колонки.

Таблица 2

Пример таблицы на полный формат

N/N	Колонка-1	Колонка-2	Колонка-3	Колонка-4	Колонка-5
1.	фффф	Ыыыы	111	*ммм*	**Тттт**
2.	фффф	Ыыыы	111	*ммм*	**Тттт**
3.	фффф	Ыыыы	111	*ммм*	**Тттт**
4.	фффф	Ыыыы	111	*ммм*	**Тттт**

Пример формулы на полный формат:

$$N_y(t)=\frac{Eh}{1-\mu^2}\left[\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{w}{R}+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2+\frac{\partial w_0}{\partial y}\frac{\partial w}{\partial y}\right]=\frac{Eh}{1-\mu^2}\xi(t). \qquad (2)$$

Пример рисунка на полный формат:

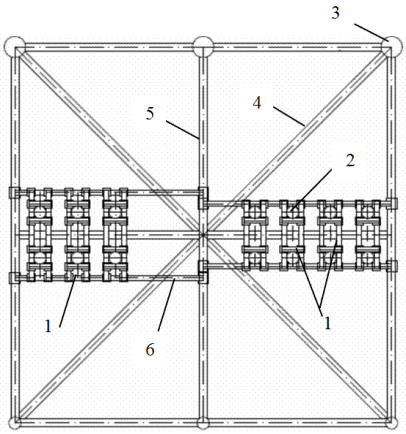


Рис. 3. Раскрепление водоотделяющих колонн с помощью жестких рам (видв плане на диафрагму МСП):
1 – жесткие рамы; 2 – водоотделяющие колонны; 3 – вертикальные стойки опорного блока; 4 – раскосы опорного блока; 5 – распорка опорного блока; 6 – фундамент жесткой рамы

Заключение

Автор данной инструкции руководствовался единственной целью – уменьшить авторам сложность подготовки статей для журнала.

Дополнительная информация (на русском, английском или обоих языках)

Информация о спонсорстве. Необходимо указывать источник финансирования как научной работы, так и процесса публикации статьи (фонд, коммерческая или государственная организация и др.). Указывать размер финансирования не требуется.

Благодарности. Авторы могут выразить благодарности людям и организациям, способствовавшим публикации статьи в журнале, но не являющимся её авторами

Литература

В библиографии (пристатейном списке литературы) каждый источник следует помещать с новой строки под порядковым номером. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТ Р 7.05-2008.

Литература и References пишутся в одну колонку без переносов

References

Список литературы на русском языке **КРОМЕ ТОГО** должен быть представлен и в романском алфавите (латинице), то есть, транслитерирован, (транслитерация – это побуквенная передача текста, написанного с помощью русского алфавита, средствами латинского алфавита), список литературы на других языках должен быть приведен на языке оригинала.

Вся транслитерация списка литературы должна быть выполнена в соответствии с системой Госдепартамента США, которая в настоящее время является наиболее распространенной.

Автоматизировать процесс транслитерации можно, воспользовавшись программным обеспечением, которое доступно по адресу www.translit.ru (в раскрывающемся списке «Варианты» выбираем вариант BGN).

Транслитерированная литература должна быть сформатирована следующим образом.

Структура библиографической ссылки на статью:
Author, A. A., Author, B. B., & Author, C. C. (2005).
Title of article. Title of Journal, 10(2), 49-53.

Материалы конференций:
Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalin I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma “Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi” (Proc. 6th Int. Technol. Symp. “New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact”). Moscow, 2007, pp. 267-272.

Книги (монографии, сборники, материалы конференций в целом):
Belaya kniga po nanotekhnologiyam: issledovaniya v oblasti nanochastits, nanostruktur i nanokompozitov v Rossiiskoi Federatsii (po materialam Pervogo Vserossiiskogo soveshchaniya uchenykh, inzhenerov i proizvoditelei v oblasti nanotekhnologii [White Book in Nanotechnologies: Studies in the Field of Nanoparticles, Nanostructures and Nanocomposites in the Russian Federation: Proceedings of the First All-Russian Conference of Scientists, Engineers and Manufacturers in the Field of Nanotechnology]. Moscow, LKI, 2007.
Nenashev M.F. Poslednee pravitel’stvo SSSR [Last government of the USSR]. Moscow, Krom Publ., 1993. 221 p.
From disaster to rebirth: the causes and consequences of the destruction of the Soviet Union [Ot katastrofy k vozrozhdeniju: prichiny i posledstvija razrushenija SSSR]. Moscow, HSE Publ., 1999. 381 p.
Kanevskaya R.D. Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov razrabotki mestorozhdenii uglevodorodov (Mathematical modeling of hydrodynamic processes of hydrocarbon deposit development). Izhevsk, 2002. 140 p.
Latyshev, V.N., Tribologiya rezaniya. Kn. 1: 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.

Шаблон для сопроводительного письма авторов

В редакцию журнала
" МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ "
190008 г.
Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д. 3

СОПРОВОДИТЕЛЬНОЕ ПИСЬМО

Просим опубликовать в журнале " МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ " статью <заголовок статьи>.

Авторами статьи являются <перечень Ф.И.О. авторов полностью>.

Работа выполнена в <полное и сокращенное название учреждения (учреждений)>.

Текущую переписку по вопросам публикации статьи следует вести с <Фамилия И.О.>.
Координаты для обратной связи:

1. Почтовый адрес (с индексом)
2. E-mail
3. Тел. служебный и домашний (с кодом города)

Авторы подтверждают, что статья ранее не была где-либо опубликована, и берут на себя ответственность за возможные нарушения авторских прав третьих лиц.

Материал выверен, цифры, факты, цитаты сверены с первоисточником, материал не содержит сведений ограниченного распространения.

Авторы дают согласие на редактирование статьи, а также на использование её полнотекстовой версии путем размещения на официальном сайте научного журнала "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ включения в различные базы данных и информационные системы.

Авторы разрешают использовать указанные в статье персональные данные и дают согласие на их опубликование.

Авторы согласны с тем, что редакция имеет право на литературное редактирование и доведение статьи до редакторских стандартов, принятых в рамках журнала.

Авторы разрешают публикацию статьи в открытом доступе на электронных ресурсах в PDF-формате и прилагают лицензионный договор от каждого автора(соавтора) статьи.

Подпись <Дата>

Шаблон рецензии

В редакцию журнала
" МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ "
190008 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д. 3

Р Е Ц Е Н З И Я

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 рецензиирование
5. Замечания и рекомендации по статье для членов редколлегии

Должность, ученое звание и научная степень

<Дата> <Подпись рецензента>

II. Замечания и рекомендации по статье для авторов

Лицензионный договор №_____

г. Санкт-Петербург **«___»_____ 20 года**

Общество с ограниченной ответственностью «НАУЧНО-ИССЛЕДОВА-ТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» (ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»), именуемое в дальнейшем "Лицензиат", в лице заместителя генерального директора-главного редактора научного журнала **«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»** Никитин Николая Васильевича, действующего на основании Доверенности № 1-59, удостоверенной нотариусом Санкт-Петербурга Володиным А.В. 21.01.2014г, с одной стороны, и **Гражданин РФ** _____, именуемый в дальнейшем "**Лицензиар**", с другой стороны, именуемые в дальнейшем "**Сторона/Стороны**", заключили настоящий договор (далее - "**Договор**") о нижеследующем.

1. Предмет Договора

1.1. По настоящему Договору **Лицензиар** на безвозмездной основе предоставляет **Лицензиату право** использования _____

_____,

(наименование, характеристика передаваемых материалов)

именуемого в дальнейшем "**Произведение**", на основе неисключительной лицензии в обусловленных Договором пределах и на определенный Договором срок.

1.2. **Лицензиар** гарантирует, что он обладает исключительными авторскими правами на передаваемое **Лицензиату** Произведение.

2. Права и обязанности Сторон

2.1. Лицензиар предоставляет Лицензиату на весь срок действия исключительных прав на Произведение следующие права:

2.1.1. право на воспроизведение Произведения (опубликование, обнародование, дублирование, тиражирование или иное размножение Произведения) без ограничения тиража экземпляров. При этом каждый экземпляр Произведения должен содержать имя **автора** Произведения;

2.1.2. право на распространение Произведения любым способом;

2.1.3. право на включение в составное произведение;

2.1.4. право на доведение до всеобщего сведения;

2.1.5. на использование метаданных (название, имя автора (правообладателя), аннотации, библиографические материалы и пр.) Произведений путем распространения и доведения до всеобщего сведения, обработки и систематизации, а также включения в различные базы данных и информационные системы.

2.1.6. право переуступить на договорных условиях частично или полностью полученные по настоящему договору права третьим лицам без выплаты **Лицензиару** вознаграждения.

2.2. **Лицензиар** передает права **Лицензиату** по настоящему Договору на основе неисключительной лицензии.

2.3. **Лицензиар**, в течение трех рабочих дней обязан предоставить **Лицензиату** Произведение в **электронной версии в формате инструкции по подготовке статей для научного журнала «Морские интеллектуальные технологии»** (**ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»**) для ознакомления. В течение 30 (тридцать) рабочих дней, если **Лицензиатом** не предъявлены к **Лицензиару** требования или претензии, связанные с качеством (содержанием) или объемом предоставленному для ознакомления Произведению, Стороны подписывают Акт приема-передачи Произведения.

2.4. Дата подписания Акта приема-передачи Произведения является моментом передачи **Лицензиату** прав, указанных в настоящем Договоре.

2.5. **Лицензиат** обязуется соблюдать предусмотренные действующим законодательством авторские права, права **Лицензиара**, а также осуществлять их защиту и принимать все возможные меры для предупреждения нарушения авторских прав третьими лицами.

2.6. Территория, на которой допускается использование прав на Произведения, не ограничена.

2.7. **Лицензиар** также предоставляет **Лицензиату** право хранения и обработки следующих своих персональных данных без ограничения по сроку:

- фамилия, имя, отчество;
- дата рождения;
- сведения об образовании;
- сведения о месте работы и занимаемой должности;
- сведения о наличии опубликованных произведений литературы, науки и искусства.

Персональные данные предоставляются для их хранения и обработки в различных базах данных и информационных системах, включения их в аналитические и статистические отчетности, создания обоснованных взаимосвязей объектов произведений науки, литературы и искусства с персональными данными и т.п.

Лицензиат имеет право передать указанные данные для обработки и хранения третьим лицам при условии уведомления о таком факте с предоставлением сведений о третьем лице (наименование и адрес) **Лицензиару**.

Отзыв согласия на хранение и обработку персональных данных производится **Лицензиаром** путем направления соответствующего письменного уведомления **Лицензиату**.

3. Ответственность Сторон

3.1. **Лицензиар** и **Лицензиат** несут в соответствии с действующим законодательством РФ имущественную и иную юридическую ответственность за неисполнение или ненадлежащее исполнение своих обязательств по настоящему Договору.

3.2. Сторона, ненадлежащим образом исполнившая или не исполнившая свои обязанности по настоящему Договору, обязана возместить убытки, причиненные другой Стороне, включая упущенную выгоду.

4. Конфиденциальность

4.1. Условия настоящего Договора и дополнительных соглашений к нему - конфиденциальны и не подлежат разглашению.

5. Заключительные положения

5.1. Все споры и разногласия Сторон, вытекающие из условий настоящего Договора, подлежат урегулированию путем переговоров, а в случае их безрезультатности, указанные споры подлежат разрешению в суде в соответствии с действующим законодательством РФ.

5.2. Настоящий Договор вступает в силу с момента подписания обеими Сторонами настоящего Договора и Акта приема-передачи Произведения.

5.3. Настоящий Договор действует до полного выполнения Сторонами своих обязательств по нему.

5.4. Расторжение настоящего Договора возможно в любое время по обоюдному согласию Сторон, с обязательным подписанием Сторонами соответствующего соглашения об этом.

5.5. Расторжение настоящего Договора в одностороннем порядке возможно в случаях, предусмотренных действующим законодательством, либо по решению суда.

5.6. Любые изменения и дополнения к настоящему Договору вступают в силу только в том случае, если они составлены в письменной форме и подписаны обеими Сторонами настоящего Договора.

5.7. Во всем, что не предусмотрено настоящим Договором, Стороны руководствуются нормами действующего законодательства РФ.

5.8. Настоящий Договор составлен в двух экземплярах, имеющих одинаковое содержание и равную юридическую силу, по одному для каждой из Сторон.

6. Реквизиты Сторон.

Лицензиар:

ФИО, дата рождения, паспорт, адрес регистрации

Лицензиат:

ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»
Адрес: 190121, г. Санкт-Петербург,
ул. Лоцманская д. 3
ИНН 7813074883, КПП 783901001
р/с 40702810255080004491
Северо-западный банк
ПАО «Сбербанк России» в Санкт-Петербурге
БИК 044030653
к/с 30101810500000000653

Лицензиар:

Лицензиат

Заместитель Генерального директора
ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»

_____/Никитин Н.В../

АКТ
к лицензионному договору №_____
г. Санкт-Петербург **«___»_____ 20___ года**

Общество с ограниченной ответственностью «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» (ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»), именуемое в дальнейшем "Лицензиат", в лице заместителя генерального директора-главного редактора научного журнала **«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»** Никитин Николая Васильевича, действующего на основании Доверенности № 1-59, удостоверенной нотариусом Санкт-Петербурга Володиным А.В. 21.01.2014г, с одной стороны, и **Гражданин РФ_____**, именуемый в дальнейшем "**Лицензиар**", с другой стороны, именуемые в дальнейшем "**Сторона/Стороны**", составили настоящий акт (далее – «Акт») к лицензионному договору №____ от «___» _____ года (далее - "**Договор**") о нижеследующем.

1. **Лицензиар** передал, а **Лицензиат** принял в соответствии с условиями Договора 1 (один) экземпляр Произведения - _____(*наименование и характеристика*) - и право его использования.

2. **Стороны** взаимных претензий по порядку и объему исполнения обязательств по Договору не имеют.

3. Настоящий Акт составлен в двух экземплярах, имеющих равную юридическую силу, по одному для каждой из Сторон.

Реквизиты Сторон.

Лицензиар:
ФИО, дата рождения, паспорт, адрес регистрации

Лицензиат:
ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»
Адрес: 190121, г. Санкт-Петербург,
ул. Лоцманская д. 3
ИНН 7813074883, КПП 783901001
р/с 40702810255080004491
Северо-западный банк
ПАО «Сбербанк России»
в Санкт-Петербурге
БИК 044030653
к/с 30101810500000000653

Лицензиар: **Лицензиат**

Заместитель Генерального директора
ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»

_____/Никитин Н.В./

Правила направления, рецензирования и опубликования научных статей в научном журнале «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

1. Правила направления

Автор (Авторы) подготавливает текст рукописи научной статьи на русском языке (название, данные про авторов и ключевые слова и на английском языке) в электронном виде в соответствии с Инструкцией по подготовке статей для научного журнала "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ".

1.1. Автор направляет на имя главного редактора сопроводительное письмо в установленной форме в соответствии с Инструкцией по подготовке статей для научного журнала "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ".

1.2. Кроме статьи, в редакцию в соответствии с Инструкцией по подготовке статей для научного журнала "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ" предоставляются:

1. одна рецензия на публикуемую статью по соответствующей специальности с подписью, заверенной гербовой печатью. При междисциплинарном исследовании предоставляются две рецензии от экспертов различных областей наук по соответствующей тематике.
2. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости).
3. Лицензионный договор, распечатанный и подписанный каждым автором.

1.3. В рецензии в свободной форме освещаются следующие вопросы: соответствует ли название статьи ее содержанию, в какой мере статья соответствует современным достижениям в рассматриваемой области научных знаний, удачно ли выбрана форма подачи материала, а также дается описание достоинств и недостатков статьи. В конце рецензии делается заключение о целесообразности публикации рецензируемого материала.
В рецензии обязательно указывается Ф.И.О., должность, ученая степень рецензента, дата. Рецензия должна быть заверена подписью рецензента и печатью организации.

Первоначальный вариант статьи, а также предоставленные рецензии хранятся в архиве редакции не менее года (как официальные документы).

1.4. Лицензионный договор в соответствии с Инструкцией по подготовке статей для научного журнала "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ" предоставляется в редакцию в распечатанном виде на бумажном носителе или в отсканированном виде. Он должен быть собственноручно подписан автором (соавторами) шариковой ручкой с синими чернилами.

1.5. Авторы предоставляют статьи и все сопроводительные документы в электронном виде и/или лично, либо по почте заказным письмом по адресу:

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

Редакция научного журнала "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

1.6. На страницах журнала публикуются новые научные разработки, новые результаты исследований, новые методы, методики и технологии в области

кораблестроения, информатики, вычислительной техники и управления. Это является основным требованием к статьям.

В журнале печатаются материалы, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях. Авторы статей несут ответственность за содержание статей и за сам факт их публикации. Редакция не всегда разделяет мнение авторов и не несет ответственности за недостоверность публикуемых данных.

1.7. Гонорар авторам не выплачивается. С аспирантов плата за публикацию статей не взимается.

1.8. Рукописи авторам не возвращаются.

1.9. Издание осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, соответствующих ее тематике, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. Рецензии хранятся в издательстве и в редакции издания в течение 5 лет.

1.10. Редакция издания направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса.

2. Правила рецензирования

2.1. При поступлении статьи в редакцию научной периодики, редактором издания производится оценка ее соответствия требованиям к оформлению рукописи, а также правилам предоставления рукописей. При нарушении правил предоставления рукописей статья отправляется автору на доработку. Рукописи, поступающие для опубликования в журнале, проверяются на соответствие техническим требованиям и профилю журнала. Материалы, не отвечающие этим условиям, возвращаются авторам с указанием причин отказа в приеме.

2.2. Поступающие от авторов научные статьи проходят редакционную научную экспертизу, определяющую их соответствие заявленной проблематике, уровень раскрытия темы, научную новизну.

Целью научной экспертизы, осуществляемой редколлегией научного журнала "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ", является содержательная экспертная оценка качества научной статьи по следующим обязательным критериям научности:

- соответствие названия статьи ее содержанию;
- формулировка решаемой проблемы или задачи;
- обоснование актуальности представленных материалов;
- исследовательский характер статьи;
- аргументированность изложения и выводов, в частности, наличие ссылок на использованную литературу и другие информационные источники;
- научная новизна и практическая значимость полученных результатов;
- наличие выводов по результатам статьи;
- наличие списка литературы со ссылками на источники из него из текста статьи.
- **Определение соответствия содержания статьи тематике журнала.** Если содержание статьи не соответствует тематике издания, она снимается с рассмотрения, об этом сообщается авторам. Материалы авторам не возвращаются.

Экспертизу осуществляют члены редколлегии научного журнала "МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ", являющиеся специалистами в соответствующих областях знаний.

2.3. В случае выявления несоответствия предоставленных материалов вышеприведенным критериям, научные редакторы передают рукопись главному редактору для вынесения решения о рекомендации доработки статьи либо ее отклонении от публикации.

Если статья нуждается в доработке, то высылается отзыв члена редакционной коллегии с замечаниями. После исправления автор высылает в редакцию статью повторно. Возвращение рукописи на доработку не означает, что статья принята к печати.

Доработанный вариант необходимо прислать в редакцию повторно, отдельно приложив письмо с ответами на замечания члена редакционной коллегии. Датой поступления статьи считается время поступления в редакцию окончательного (переработанного) варианта.

2.4. Статьи, принятые редакцией научных журналов, распределяются по рубрикам, соответствующим научными направлениями, по которым специализируется журнал.

3. Правила опубликования научных статей, аннотаций и ключевых слов

3.1. Принятые к публикации статьи проходят редактирование, предусматривающее предпечатную подготовку статьи к размещению в очередном номере журнала.

3.3. Тиражирование журнала производит издательско-полиграфический центр НИЦ «МОРИНТЕХ» в строгом соответствии с периодичностью выхода в свет издания.

3.4. Перепечатка допускается только с разрешения редакции.

Главный редактор научного журнала
«МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» Н.В. Никитин

Есть на складе издательства

Гайкович А. И.
Основы теории проектирования сложных технических систем
СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2001, 432 стр.

Монография посвящена проблеме проектирования больших разнокомпонентных технических систем. Изложение ведется с позиций системного анализа и достижений прикладной математики и информатики.
Есть в продаже**: цена 420 руб. + пересылка**

Коршунов Ю. Л.
Люди, корабли, оружие (К 70-летию 1-го ЦНИИ МО РФ)
СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 176 стр.

Книга содержит историю научно-исследовательских институтов кораблестроения и морского оружия. Автор приводит большое количество фактов, характеризующих деятельность институтов на различных этапах развития флота.
Есть в продаже: **цена 280 руб. + пересылка**

Архипов А. В., Рыбников Н. И.
Десантные корабли, катера и другие высадочные средства морских десантов
СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2002, 280 стр.

Изложен опыт проведения морских десантных операций, их особенности, характерные черты и тенденции развития этого вида боевых действий. Рассмотрены наиболее существенные аспекты развития десантных кораблей, катеров и других высадочных средств морских десантов. Затронуты некоторые особенности проектирования десантных кораблей и возможные пути совершенствования расчетных методов.
Есть в продаже: **цена 320 руб. + пересылка**

Караев Р. Н., Разуваев В. Н., Фрумен А. И.
Техника и технология подводного обслуживания морских нефтегазовых сооружений.
Учебник для вузов
СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2012, 352 стр.

В книге исследуется роль подводно-технического обслуживания в освоении морских нефтегазовых месторождений. Приводится классификация подводного инженерно-технического обслуживания морских нефтепромыслов по видам работ.

Изложены основные принципы формирования комплексной системы подводно-технического обслуживания морских нефтепромыслов, включающей использование водолазной техники, глубоководных водолазных комплексов и подводных аппаратов.
Есть в продаже: **цена 1500 руб. + пересылка**

Шауб П. А.
Качка поврежденного корабля в условиях морского волнения
СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 144 стр.

Монография посвящена исследованию параметров бортовой качки поврежденного корабля, судна с частично затопленными отсеками в условиях морского волнения. Выведена система дифференциальных уравнений качки поврежденного корабля с учетом нелинейности диаграммы статической остойчивости, начального угла крена, затопленных отсеков III категории.

Книга предназначена для специалистов в области теории корабля, а также может быть полезной для аспирантов, инженеров и проектировщиков, работающих в судостроительной области, занимающихся эксплуатацией корабля, судна.
Есть в продаже: **цена 350 руб. + пересылка**

Гидродинамика малопогруженных движителей: Сборник статей
СПб, НИЦ МОРИНТЕХ, 2013, 224 стр.

В сборнике излагаются результаты исследований гидродинамических характеристик частично погруженных гребных винтов и экспериментальные данные, полученные в кавитационном бассейне ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова в 1967–2004 гг. его эксплуатации при отработке методик проведения испытаний на штатных установках.
Есть в продаже: **цена 250 руб. + пересылка**

Гайкович А. И.
Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов т. 1, 2
СПб., НИЦ МОРИНТЕХ, 2014

Монография посвящена теории проектирования водоизмещающих кораблей и судов традиционной гидродинамической схемы. Методологической основой излагаемой теории являются системный анализ и математическое программирование (оптимизация).
Есть в продаже: **цена 2-х т. 2700 рублей + пересылка**