

MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

4 4 Hz | 86 Hz | 170 Hz | 340 Hz | 679 Hz | 1.3 kHz | 2.6 kHz | 5.1 kHz | 10.1 kHz | 20 kHz

МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

1001101001101111001010011010101000011011100011001001001011001100110001011010010010010001010101
00110101101100111000100111001000101110010011100101010011001001100011001010010101001101001001010
1001000111100110111100101001101110011001010001101010011001100101010110001010010010101110100110
00101001011001100100110010011101100111000100110010010010101000011100110010011100010110100100100
00110101001110100100010110100101000100100001111100110011001101101011001110000001110010100101
11011100110010101111001010101001010011010011100010110010100110010101111001010111100101101001010
00001110101001111000101011001000111001101101001001101101100110010101001110010100110010010011001
11001100011100100110001010010100111101010101000001010101000110101110011001000111001010010010100
00101001110011010011110001010010101011101010010000101100011001100101011000101011001101001010010

№ 2 (28) Т.1 2015



Труды

Санкт-Петербургского государственного морского технического университета



МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал № 2 (28) Т.1 2015 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, заместитель генерального директора ЦМКБ «Алмаз»

Е.М. Апполонов, Ректор СПбГМТУ

Члены Совета

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

М.И. Вайнерман генеральный директор ЦКБ "ЛАЗУРИТ"

В.А. Василенко, генеральный директор НИТИ им.

А.П. Александрова

А.И. Гайкович генеральный директор НИЦ "МОРИНТЕХ"

Г.Н. Муру, генеральный директор 51 ЦКТИ судоремонта

К.В. Рождественский, проректор по международному сотрудничеству СПбГМТУ

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

В.Н. Тряскин, проректор СПбГМТУ по учебной работе

А.К. Филимонов, проректор СПбГМТУ по научной работе

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

Редакционная коллегия

Заместители главного редактора

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

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

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

Члены Редколлегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 научного журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

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

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

Напечатано в центре полиграфии НИЦ «МОРИНТЕХ»

Дизайн: А.В. Антонов



MARINE INTELLECTUAL TECHNOLOGIES

Scientific journal № 2 (28) V.1 2015

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, Vice-CEO ZMKB "Almaz"

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

Council Members

A.V Arkhipov, Director, Research Institute of Shipbuilding and armaments of Russian Navy

M.I. Vajnerman, CEO, ZKB Lasurit

V.A. Vasilenko, CEO, A.P. Aleksandrov NITI

A.I. Gajkovich, CEO, Research Centre Marine Intelligent Technologies

G.N. Muru, CEO, 51 CCIS,

K.V. Rozhdestvensky, Vice-Rector for International Science & Education, SMTU

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

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

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

A.V. Shlyakhtenko, CEO and Chief Designer ZMKB "Almaz"

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

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

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

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

V. V. Rodionov, 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 Kom-somolsk-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-of House 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**



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

51

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ
КОНСТРУКТОРСКО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ
СУДОРЕМОНТА



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



Санкт-Петербург, Ломоносов
198412, ул. Михайловская, д. 14
Тел./факс: (812) 423 1800

СОДЕРЖАНИЕ

Теория корабля и строительная механика

Бесядовский А.Р., Пхио Киав Свар Пхае Экраноплан план с разрезным крылом: особенности аэродинамики	9
Овчинников К.Д., Ткаченко И.В., Тряскин Н.В. Численное моделирование качки полупогружной платформы на регулярном волнении	14
Никущенко Д.В. К вопросу о выборе системы координат при исследовании динамики подводных объектов	19
Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Предельное состояние жесткопластичной балки в виде несимметричного двутавра при комбинированном нагружении	26

Проектирование и конструкция судов

Дехтярь И. В., Тряскин В. Н. Проектирование поперечного рамного бортового набора корпуса надводного корабля	35
--	----

Физические поля корабля, океана, атмосферы и их взаимодействие

Пугачев С.И., Рытов Е.Ю., Малышкина О.В., Топчиёв А.А., Краснов А.А., Мараховский М.А., Нагаенко А.В. Ультразвуковое формообразование пьезокерамики, содержащей ультрадисперсные частицы	41
---	----

Управление в социальных и экономических системах

Алексеев А. В. Концептуальные аспекты управления развитием критических объектов морской техники и морской инфраструктуры	47
Алексеев А. В. 100 лет теоремы отсчетов: исследования, обобщения и приложения	58
Алёхин М.Ю., Волостных В.В. Современные проблемы стратегического управления развитием судостроения	71

Математическое моделирование

Клещёв А.А. Дифракция импульсных звуковых сигналов на упругих телах сфероидальной формы, находящихся в плоском волноводе	76
Легуша Ф.Ф., Мусакаев М.А., Попков С.В., Чижов Г. В. Импеданс плоской границы раздела газ-жидкость с учетом диссипации энергии в акустическом пограничном слое	81
Афанасов Е.Н., Кадыров С.Г. Малые колебания твердого тела в потоке вязкой несжимаемой жидкости	88
Зуева Е.С. Исследование растекания нефти в ледовом судоходном канале	94

CONTENTS

Theory of the ship and structural mechanics

Besyadovskiy A.R., Phyo Kyaw Swar Phay WIG crafts with the slotted wing. Aerodynamics features	9
Ovchinnikov K.D., Tkachenko I.V., Tryaskin N.V. Numerical simulation of semi-submersible rig motions in regular waves.....	14
Nikushchenko D. V. On reference frames used in investigations vehicles dynamics	19
Korshunov V. A., Ponomarev D. A., Rodionov A.A. Ultimate state of an asymmetric double tee stiff-plastic beam section under combined loading	26

Design and construction of vessels

Dekhtyar I.V., Tryaskin V.N., Design of naval ships side transverse web frames	35
---	----

Physical Fields of Ship, Ocean, Atmosphere and Their Interaction

Pugachev S.I., Rytov E.I., Malyshkina O.V., Topchiev A.A., Krasnov A.V., Marakhovskiy M.A., Nagaenko A.V. Ultrasound molding piezoelectric ceramics containing the ultrafine particles	41
---	----

Control in Social and Economic Systems

Alekseev A.V. Conceptual aspects of development of critical marine facilities and marine infrastructure	47
Alekseev A.V. 100 years of the sampling theorem: research, synthesis and application	58
Alekhin M. Y., Volostnykh V.V. Challenging problems of strategic management in shipbuilding	71

Mathematical Modelling

Kleshchev A.A. Diffraction of pulse sound signals on elastic bodies of spheroidal form, put in plane waveguide	76
Legusha F.F., Musakaev M.A., Popkov S.V., Chizhov G.V. Impedance plane boundary gas-liquid interface with taking into account energy dissipation in the acoustic boundary layer	81
Afanasov E.N, Kadyrov S.G. Small oscillations of a rigid body in the flow of a viscous incompressible fluid	88
Zueva E.S. Investigation of oil spreading in ice navigation channel	94

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, post-graduate students and students of higher educational institutions.

Subscription index is 99366 in Interregional Subscription Agency.

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

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

Subject

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

Basic Magazine Trends

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

Теория корабля и строительная механика

УДК 629.7.022, 533.682, 533.6.013.416

ЭКРАНОПЛАН С РАЗРЕЗНЫМ КРЫЛОМ. ОСОБЕННОСТИ АЭРОДИНАМИКИ

Бесядовский Александр Романович

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

Пхио Киав Свар Пхасе

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

Аннотация

Развитие аэродинамики экранопланов тормозиться из-за отсутствия перспективной компоновки, совмещающей полноценное использование экранного эффекта и обеспечение автоматической продольной устойчивости движения аппарата. На сегодняшний день имеется четыре основные аэродинамические компоновки: самолетная, схема Липпиша, летающее крыло и составное крыло. Из них только схема летающего крыла в полной мере реализует преимущества полета у границы раздела. Но она не удовлетворяет требованиям устойчивости. В работе рассмотрена модификация этой схемы, состоящая из нескольких изолированных крыльев, каждое из которых может устанавливаться с произвольным углом атаки. Для решения задачи проведен численный эксперимент методом CFD. В результате получена база данных, включающая аэродинамические характеристики – силы и моменты, их производные, положение аэродинамических фокусов и другую информацию, позволяющую оценить возможности компоновки. Сделаны выводы о влиянии установочного угла атаки отдельных крыльев на другие элементы и на суммарные характеристики системы. Предложены варианты комбинации углов атаки, обеспечивающих хорошие несущие способности компоновки. Показана возможность получения устойчивого режима движения.

Ключевые слова: Экраноплан, граница раздела сред, аэродинамическая компоновка, силы и моменты, аэродинамические фокуса, устойчивость продольного движения.

WIG CRAFT WITH THE SLOTTED WING. AERODYNAMICS FEATURES

Besyadovskiy Alexander Romanovich

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

Phyo Kyaw Swar Phay

the magistr of DEPARTMENT OF HYDROAEROMECHANIC AND MARINE ACOUSTICS,

STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG

Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: phyokyawswarphay@gmail.com

Abstract

Purpose. The development of the WIG crafts aerodynamics is slowed down because of the absence of the perspective configuration which combines full-fledged use of ground effect and maintenance of automatic longitudinal (pitch) stability of movement of the vehicle. From the known aerodynamic schemes the "All wing" model fully applies the advantages of the ground effect only. But it does not meet stability requirements. It is necessary to search for ways of the decision of this problem.

Design/methodology/approach. In the paper we compare this model with the scheme which consists of several isolated wings. Each of these wings can be established with any angle of attack separately. To accomplish the task a numerical experiment by CFD has been conducted.

Findings. As a result, the database which includes aerodynamic characteristics i.e. forces and the moments, their derivatives, aerodynamic focuses position and other information is built up. This allows to estimate the configuration possibilities. The results show the influence of an adjusting angle of attack of separate wings on the other elements and on total characteristics of the system. Some variants of the combination of the angles of attack which provide good flight characteristics of the configuration are offered. The possibility to achieve the pitch stability mode is shown.

Originality/value. The results of investigations shows, that the new configuration with slotted wing, in future, may give us the possibilities to get a good lifting characteristics and pitch stability together.

Keywords: WIG craft, ground effect, aerodynamic configuration, forces and the moments, aerodynamic focuses, longitudinal (pitch) stability.

Введение

Работа посвящена рассмотрению актуальной на современном этапе задачи: поиску путей создания компоновки корабля-экраноплана с требуемыми несущими свойствами и характеристиками продольной устойчивости. Проектированием экранопланов сейчас занимаются в первую очередь на востоке – в Корее и Китае. В нашей стране, в настоящее время, этим вопросам уделяется мало внимания, хотя задел, созданный в свое время Р.Е.Алексеевым, до сих пор до конца не реализован.

Преимущества судов, использующих экранный эффект, известны [1]. Но на пути разработки реального судна стоит ряд не решенных до сих пор проблем. Основная – обеспечение продольной устойчивости полета для компоновок схемы «летающее крыло», позволяющих в наибольшей степени реализовать влияние экрана.

1. Цель и задачи

В работе проведено сравнение аэродинамических характеристик схемы «летающее крыло» [2] и модифицированной схемы «тандем» [3] (рис.1). Во втором случае компоновка состоит из пяти установленных последовательно в одной плоскости крыльев увеличенного удлинения. Каждое крыло может устанавливаться под различными углами атаки, независимо от остальных. При этом задние кромки всех крыльев при нулевом угле тангажа

располагаются на одном расстоянии от экрана. В такой компоновке увеличение удлинения отдельных крыльев приводит к росту локальной подъемной силы, а увеличение относительной высоты каждого крыла – к ее падению. Кроме того имеет место интерференция между соседними крыльями. Предполагалось выяснить, как повлияет совокупность этих параметров на несущую способность компоновки в целом.

2. Методы и предмет исследований

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

Было проведено большое количество расчетов, в процессе которых варьировались высота полета, углы тангажа и углы атаки отдельных крыльев. Это позволило получить обширный материал для дальнейшего изучения влияния геометрии на несущие характеристики и параметры устойчивости.

При расчетах использовалась корабельная система координат. Ось X направлена вперед, по движению аппарата. Ось Z – вверх. Ось Y – на правый борт (рис.2).

На первом этапе рассматривались две компоновки. Одна представляла собой крыло относительной толщиной 10 % с плоскими

вертикальными шайбами. Профиль крыла имел плоскую нижнюю поверхность и верхнюю, соответствующую четырехзначному профилю НАСА 0010.

Удлинение крыла $\lambda=0.5$.

Вторая компоновка состояла из пяти крыльев с суммарной хордой равной хорде крыла в первой компоновке и того же размаха. Удлинение отдельного крыла $\lambda=2.5$.

Угол атаки каждого из крыльев варьировался от 0 до 8 градусов с шагом 2.

Высота полета компоновки обезразмеривалась по хорде отдельного крыла и менялась в пределах 0.25 до 0.75 с шагом 0.25.

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

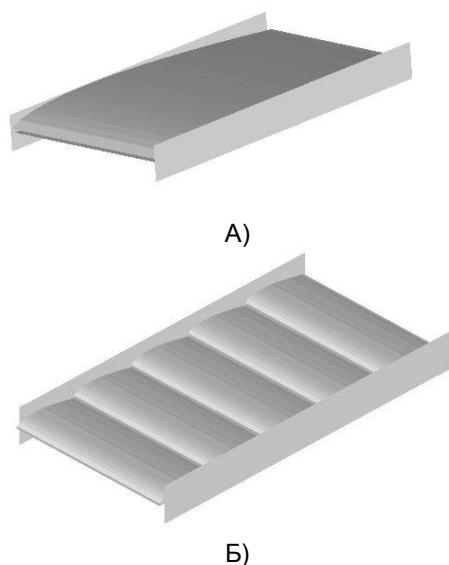


Рис. 1. Сравнимые компоновки

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

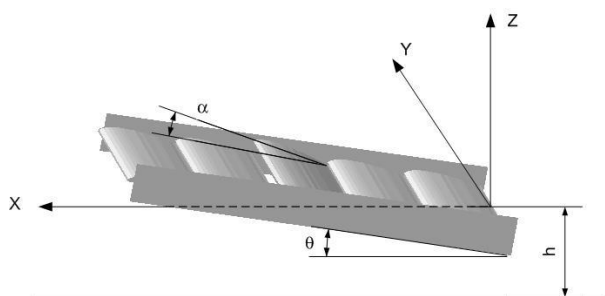


Рис.2. Параметры движения.

α – угол атаки крыла, θ – угол тангажа компоновки, h – высота над экраном

3. Результаты и выводы

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

Сравнение несущих способностей двух компоновок при движении на различных относительных высотах приведено на рис.3.

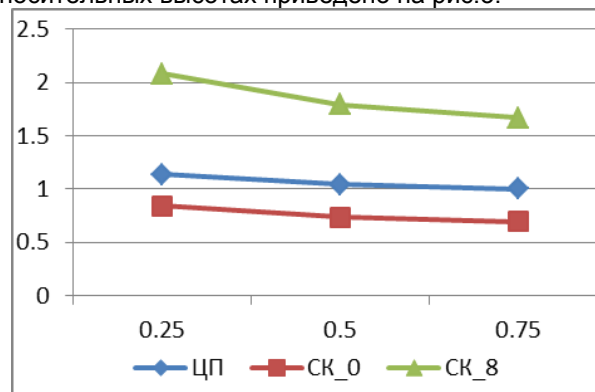


Рис.3а. Угол тангажа $\theta=0^\circ$

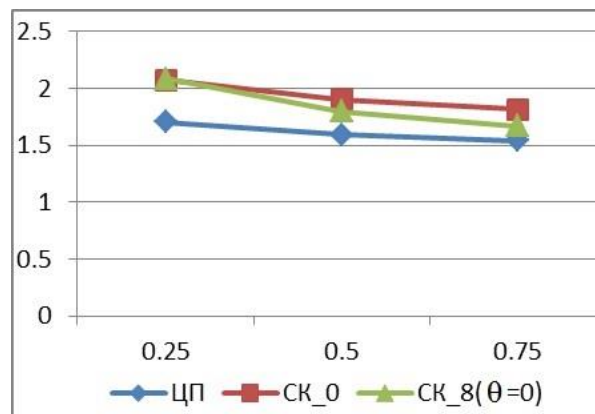


Рис. 3б. Угол тангажа $\theta=8^\circ$

Рассмотрено одиночное крыло (далее – центроплан ЦП) и система крыльев (СК) при двух углах тангажа 0 и 8 градусов. При этом все крылья в системе в одном случае были установлены с углом атаки 0 градусов, а во втором – 8 градусов.

Данные для СК при угле атаки 8 градусов и угле тангажа 8 градусов не приведены, поскольку и так можно сделать вывод, что система крыльев имеет преимущество по сравнению с одиночным крылом при больших углах тангажа и проигрывает на малых на всех рассмотренных высотах. Установка отдельных крыльев с углом атаки 8 градусов позволяет при нулевом угле тангажа получить величину подъемной силы большую, чем у ЦП при угле тангажа 8 градусов. С ростом высоты полета этот эффект убывает.

К сожалению, во всех рассмотренных случаях критерий устойчивости продольного движения (критерий Иродова [4]) не выполняется.

Для оценки влияния интерференции крыльев на несущие свойства компоновки были рассмотрены следующие варианты. Одно из

крыльев СК устанавливалось с углом атаки 8 градусов, остальные имели нулевой угол.

На рис.4 приведены данные для случая установки под углом атаки первого, третьего и пятого (последнего) крыла. При этом выводятся коэффициенты подъемной C_z силы на каждом крыле, составляющем компоновку. Для сравнения приведены аналогичные величины для случая, когда все крылья имели угол атаки 0 градусов. Следует обратить внимание, что за счет несимметрии профиля, даже при установке с нулевым углом атаки, на крыльях у экрана возникает подъемная сила. Этот график построен для случая движения компоновки с углом тангажа $\theta=0$ на относительной высоте $h=0.25$.

Видно, что крыло с углом атаки увеличивает подъемную силу на крыльях, расположенных впереди. В то же время эффективность крыльев, лежащих кормовее, уменьшается. Этот эффект можно объяснить дополнительным скосом потока, возникающим при обтекании крыла с циркуляцией.

На рисунке 5 приведена зависимость коэффициента C_z для компоновки в целом при том же режиме движения, при установке различных крыльев с углом атаки 8 градусов. Из него видно, что рационально увеличивать угол атаки на кормовых крыльях.

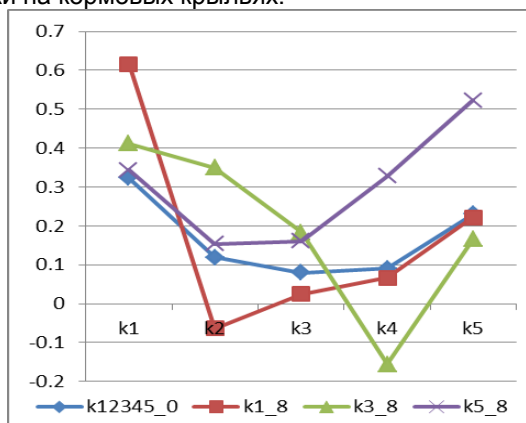


Рис.4. Коэффициент C_z на отдельных крыльях

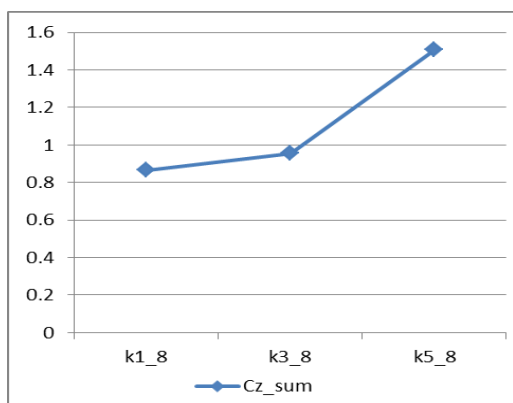


Рис.5. Коэффициент C_z на компоновке

На графике 6 приведено сравнение коэффициента C_z для компоновки в целом при различных случаях установки отдельных крыльев и одного центроплана. По оси отложено

сочетание цифр, показывающих углы атаки в градусах каждого крыла в компоновке.

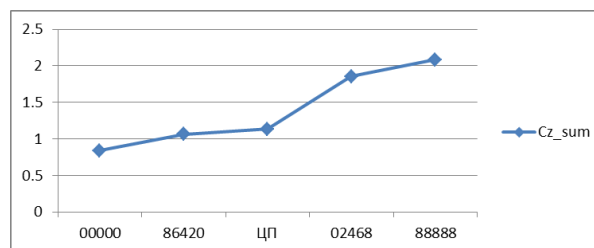


Рис.6. Суммарный коэффициент подъемной силы для разных вариантов компоновки

Как следует из графика при установке всех крыльев под углом 8 градусов и установке «веером», когда первое крыло стоит с нулевым углом атаки, а последнее – с максимальным (8°), коэффициенты подъемной силы всей компоновки оказываются близки.

То же можно сказать и про первые три случая. Это следствие аэродинамической интерференции элементов.

Как показал анализ всей совокупности полученных результатов, имеются редкие случаи, когда расположение фокусов компоновки удовлетворяют критерию статической устойчивости.

В частности это имеет место для одного из режимов в случае расположения крыльев по схеме 86420. Т.е. носовое крыло стоит с углом атаки 8 градусов, кормовое – 0, а у остальных угол атаки уменьшается в пределах этого диапазона рис.7.

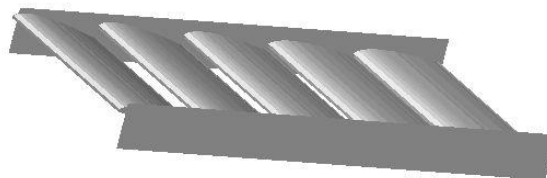


Рис.7

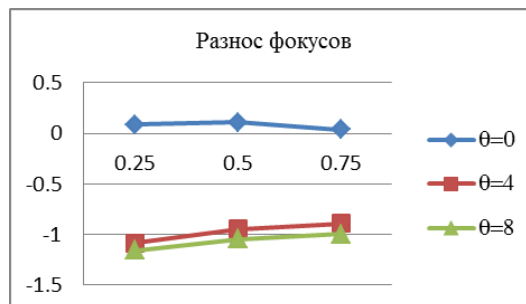


Рис. 8. Зависимость разности фокусов от относительной высоты и угла тангажа

При угле тангажа $\theta=0$ на всех рассмотренных высотах (рис.8) имеется положительный, хотя и очень маленький, разнос фокусов. Правда, несущие способности компоновки в этом случае

не высокие.

Для компоновки из нескольких крыльев, по сравнению с одиночным крылом, фокус по высоте смещается в нужную сторону (вперед). Это же имеет место при увеличении угла атаки носовых крыльев.

Положение фокуса по тангажу слабо зависит от установки крыльев, но увеличение угла атаки передних элементов также благоприятно влияет на его положение.

Полученные результаты могут представлять интерес для конструкторов экранопланов. Заслуживает внимания возможность получить большие значения подъемной силы при использовании нескольких крыльев той же площади. Кроме того, при использовании составного крыла появляется возможность варьировать углы атаки отдельных крыльев, для улучшения несущих характеристик, сохраняя при этом неизменным угол тангажа аппарата. Представляет интерес влияние установки отдельных крыльев с различными углами атаки на поведение аэродинамических фокусов по

высоте и углу тангажа. Полученные данные позволяют целенаправленно изменять положение носовых и кормовых крыльев для достижения нужных результатов.

К сожалению, расчеты показали невозможность получить для рассмотренных вариантов благоприятного разнеса фокусов, кроме очень узкого диапазона высот и углов тангажа. Но в данном случае отрицательный результат – тоже результат. Он дает возможность внести коррективы в аэродинамическую компоновку. Можно предполагать, что использование даже небольшого по размерам горизонтального оперения позволит решить проблему устойчивости. Другой путь – переход к схеме «составного крыла». В этом направлении и предполагается проведение дальнейших исследований.

Понятно, что численный эксперимент не дает полностью объективной картины исследуемых явлений. Поэтому планируется провести продувку модели в аэродинамической трубе СПбГМТУ

Литература

1. Н.И. Белавин. Экранопланы. Л.: «Судостроение», 1977, 230 с.
2. Плисов Н.Б., Рождественский К.В., Трешков В.К. Аэрогидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. Л.: Судостроение, 1991, 248 с.
3. С.М. Белоцерковский. Решетчатые крылья. М.: Машиностроение, 1985, 320 с.
4. Р.Д. Иродов. Критерии продольной устойчивости экраноплана. Уч. записки ЦАГИ, т.1, №4, 1970, 63-71

References

1. N.I.Belavin. Ekranoplany. L.: «Sudostroenie», 1977, 230 p.
2. Plisov N.B., Rozhdestvenskiy K.V., Treshkov V.K. Aerogidrodinamika sudov s dinamicheskimi printsipami podderzhaniya. L.: Sudostroenie, 1991, 248 p.
3. S.M. Belotserkovskiy. Reshetchatye kryl'ya. M.: Mashinostroenie, 1985, 320 p.
- R.D. Irodov. Kriterii prodol'noy ustoychivosti ekranoplana. Uch. zapiski TsAGI, t.1, №4, 1970, 63-71

УДК 532.322

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЧКИ ПОЛУПОГРЖНОЙ ПЛАТФОРМЫ НА РЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

Овчинников Кирилл Дмитриевич,

аспирант кафедры гидроаэромеханики и морской акустики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: ovchinnikov_kd@mail.ru

Ткаченко Игорь Вячеславович, доктор технических наук,
заведующий кафедрой гидроаэромеханики и морской акустики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: igor.v.tkachenko@mail.ru

Тряскин Никита Владимирович,
старший преподаватель кафедры гидроаэромеханики и морской акустики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: nikita.tryaskin@smtu.ru

АННОТАЦИЯ

В работе приводятся результаты численного моделирования вертикальной и килевой качек полупогружной платформы на регулярном волнении. В основе модели движения жидкости лежат осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, дополненные моделью турбулентности. Для моделирования свободной поверхности используется метод объёма жидкости (Volume of Fluid – VoF). Уравнения гидродинамики дополняются динамическими уравнениями Эйлера, описывающими шесть степеней свободы перемещения твёрдого тела. Для проведения численного моделирования использовался открытый некоммерческий пакет OpenFOAM. Целью работы являлось получение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) вертикальной и килевой качек полупогружной платформы. Выполненное численное моделирование позволило выявить нелинейный характер динамики полупогружной платформы на волнении, а также систему вторичных волн, возникающих при взаимодействии со стойками платформы. Результаты показали хорошее согласование с аналитическими оценками по линейной теории качки без учёта демпфирования и инерционной части возмущающей силы.

Ключевые слова: качка, волнение, вязкая жидкость, полупогружная платформа, VoF, свободная поверхность

NUMERICAL SIMULATION OF SEMI-SUBMERSIBLE RIG MOTIONS IN REGULAR WAVES

Kirill D. Ovchinnikov,

PhD student of the DEPARTMENT OF HYDROMECHANICS AND MARINE ACOUSTICS
State Marine Technical University of Saint-Petersburg
Saint-Petersburg, Russia
E-mail: ovchinnikov_kd@mail.ru

Igor V. Tkachenko, Dr.Sci.Tech.,

Head of the DEPARTMENT OF HYDROMECHANICS AND MARINE ACOUSTICS
State Marine Technical University of Saint-Petersburg
Saint-Petersburg, Russia
E-mail: igor.v.tkachenko@mail.ru

Nikita V. Tryaskin,

Senior lecturer of the DEPARTMENT OF HYDROMECHANICS AND MARINE ACOUSTICS
State Marine Technical University of Saint-Petersburg
Saint-Petersburg, Russia
E-mail: nikita.tryaskin@smtu.ru

ABSTRACT

The results of the numerical simulations of heave and pitch motions of the regular waves of the semi-submersible rig are presented. Semi-submersible rig consists of six columns located on two pontoons and the riser casing column located in the middle of rig. The Reynolds averaged Navier-Stokes equations coupled by turbulence model are used. To estimate free surface elevation the Volume-of-Fluid (VoF) method is applied. To describe semi-submersible platform translation the Six Degree of Freedom (6DoF) based on the rigid body dynamics Euler's rotation equations method is used. Open Source Field Operation and Manipulation (OpenFOAM) toolbox and its modified interDyMFoam solver are applied for numerical simulations. The purpose of this study is the estimation of the response amplitude operator (RAO) of the semi-submersible platform on regular waves. Non-linear effect of semi-submersible platform motions and diffraction of the wave systems between columns were detected. The obtained results of simulations are shown good approval with theoretical predictions without damping effect and diffraction exciting force.

Key words: motions, waves, viscous liquid, semi-submersible platform, VoF, free surface

Введение

Освоение природных ресурсов на морском шельфе становится приоритетной задачей для ведущих экономик мира. В связи с этим возникает необходимость строительства буровых платформ и судов обеспечения, и как следствие, проведение гидродинамических исследований подобных объектов. В настоящей работе проведено исследование гидродинамических характеристик и параметров качки полупогружной платформы методами вычислительной гидродинамики в открытом некоммерческом пакете OpenFOAM.

Традиционно параметры качки платформ оцениваются на основе модели идеальной жидкости, что осложняет описание нелинейных волновых процессов [1]. Для их учёта необходимо воспользоваться моделью вязкой среды. В большинстве работ посвящённых изучению гидродинамических характеристик платформ на основе модели вязкой жидкости основное внимание уделяется структуре потока, в частности, вихреобразованию [2-3].

В общем методике численных расчётов параметров качки полупогружных платформ мало отличается от методик расчётов качки судов. В настоящем исследовании предпринята попытка обобщить методику [4] на полупогружную буровую платформу.

1. Математическая постановка задачи

Турбулентное течение вязкой несжимаемой весомой жидкости может быть описано осреднёнными уравнениями неразрывности и Рейнольдса

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} + \langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \langle u_i \rangle}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \langle u_i' u_j' \rangle}{\partial x_j} + g_i + F_{\sigma} \tag{2}$$

где u_i - компонента вектора скорости, ρ - плотность, p - давление, ν - кинематическая вязкость, g_i - ускорение свободного падения, F_{σ} - сила по-

верхностного натяжения, $-\langle u_i' u_j' \rangle$ - напряжения Рейнольдса.

Для исследования качки полупогружной платформы на волнении можно рассмотреть абсолютное движение жидкости. Граница раздела воздух - вода может быть эффективно описана с помощью метода объёма жидкости (VoF) [5]. Согласно методу VoF среда газ-жидкость рассматривается как единая субстанция, поэтому уравнения (1)-(2) справедливы во всей области течения. В настоящей работе используется модифицированная версия VoF [6]

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \frac{\partial \langle u_j \rangle \alpha_q}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_q (1 - \alpha_q) U_r) \tag{3}$$

где U_r - поле скорости поджатия границы, а фактически - антидиффузия. Введённый искусственный член $\alpha_q (1 - \alpha_q)$ активен только вблизи границы. Плотность и кинематическая вязкость определяются зависимостям

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \tag{4}$$

$$\nu = \sum \alpha_q \nu_q \tag{5}$$

а объёмная сила поверхностного натяжения следующим выражением

$$F_{\sigma} = -\sigma \delta(\Phi) kn \tag{6}$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения, k - кривизна поверхности

Для замыкания уравнений Рейнольдса используются градиентно-диффузионная гипотеза

$$-\langle u_i' u_j' \rangle = 2\nu_t \langle S_{ij} \rangle \tag{7}$$

где ν_t - турбулентная вязкость, и $k - \omega$ SST модель [7].

Система уравнений (1)-(3) позволяет определить главный вектор гидродинамической силы F_p и главного момента гидродинамических сил относительно центра масс M_p .

Движение твёрдого тела, обладающего шестью степенями свободы, может быть описано динамическими уравнениями Эйлера

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{X}_C &= F_X = F_{pX} \\ m\ddot{Y}_C &= F_Y = F_{pY} \\ m\ddot{Z}_C &= F_Z = mg - F_A + F_{pZ} \\ J_x\dot{\omega}_x + (J_z - J_y)\omega_z\omega_y &= M_x \\ J_y\dot{\omega}_y + (J_x - J_z)\omega_x\omega_z &= M_y \\ J_z\dot{\omega}_z + (J_y - J_x)\omega_y\omega_x &= M_z \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где X_C, Y_C, Z_C - координаты центра тяжести, m - масса тела, F_A - сила Архимеда, J_x, J_y, J_z - моменты инерции, $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ - проекции угловой скорости вращения тела, M_x, M_y, M_z - проекции пары моментов $M = M^A + M^P$, M^A - момент архимедовой силы.

В качестве граничных условий для системы уравнений (1)-(9) используются следующие: на входной границе, расположенной перед платформой, компоненты вектора скорости и положение уровня жидкости определяются зависимостями волновой теории Стокса. На этой же границе известны значения k , ϵ и ω ; на выходной границе, расположенной за телом, задаётся нормальная компонента скорости и нулевые градиенты для полей скаляров; на верхней границе расчётной области определяется значение давления. Полагается, что в начальный момент времени жидкость находится в состоянии покоя. Численное интегрирование системы уравнений (1)-(9) в пакете OpenFOAM осуществляется методом контрольного объёма с использованием динамических сеток и схем второго порядка.

2. Результаты численного моделирования

Исследования вертикальной и килевой качек были выполнены для полупогружной платформы, основные размерения которой следующие: длина по ватерлинии $L = 83$ м, ширина $B = 77.7$ м, осадка $T = 23.5$ м.

Расчёты выполнялись на динамической сетке, состоящей из трёх миллионов ячеек на университетском кластере СПбГМТУ. Плотность воздуха полагалась равной $\rho_{\text{воздуха}} = 1.233$ кг/м³, кинематическая вязкость - $\nu_{\text{воздуха}} = 1.5 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Плотность

и кинематическая вязкость воды - $\rho_{\text{вода}} = 1000$ кг/м³ и $\nu_{\text{вода}} = 1.11 \cdot 10^{-6}$ м²/с соответственно. Для моделирования регулярного волнения использовался модифицированный решатель waveDyMFoam.

Исследования вертикальной и килевой качек полупогружной платформы на регулярном волнении были выполнены при различных отношениях длины волны к длине платформы λ/L . На рис. 1 представлены АЧХ вертикальной и килевой качек, на котором введены следующие обозначения: ω - круговая частота, рад/с; η_3 - амплитуда вертикальной качки, м; ζ_a - амплитуда волнения, м; ψ - амплитуда килевой качки, рад; α - угол волнового склона, рад. Эти качки возникают в диапазоне частот $\omega \leq 0.7$ рад/с. Первое усиление вертикальной качки происходит при частоте $\omega = 0.45$ рад/с, что хорошо согласуется с аналитическим решением [1] (рис. 1а). Параметрические резонансы вертикальной и килевой качек наблюдаются при частоте волны

$\omega = 0.25$ рад/с, что соответствует отношению длины волны к длине платформы - $\lambda/L = 12$. Аналогичные значения предсказывают и аналитические оценки, которые сделаны без учёта демпфирования и инерционной части возмущающей силы. Первое усиление килевой качки возникает при частоте волны $\omega = 0.49$ рад/с. Положение платформы при этих параметрах волнения представлены на рис. 2.

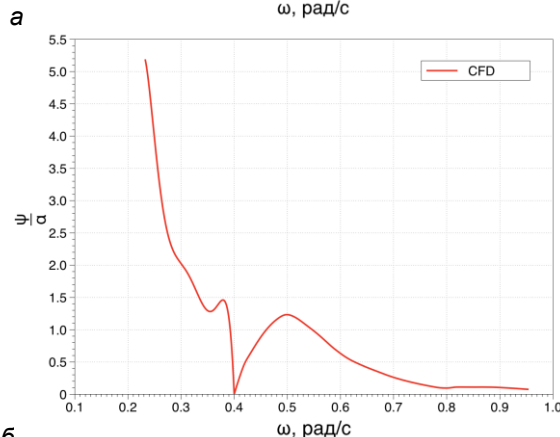
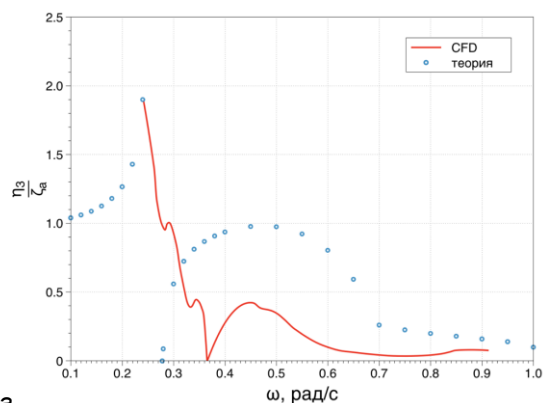


Рис. 1. АЧХ вертикальной (а) и килевой (б) качек.

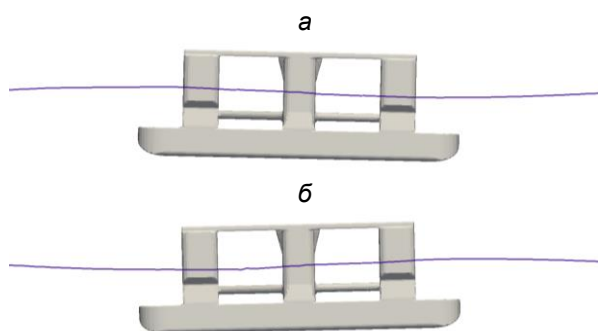


Рис. 2. Положения полупогружной платформы при $\lambda/L=3$ на моменты времени: а – t , б – $1.5 t$.

Между стойками полупогружной платформы в расчётах наблюдаются нелинейные волновые процессы - возникновение вторичных волн, - обусловленные взаимодействием первой волновой моды с колоннами (рис. 3). Это приводит к тому, что значения параметров АЧХ, полученных методами вычислительной гидродинамики, отличаются от аналитических. В численных расчётах наблюдаются дополнительные локальные максимумы. Кроме того, методы вычислительной гидродинамики позволяют в полной мере учесть присоединённые и демпфирующие силы и момент, а также главную и инерционную части возмущающей силы. В целом можно утверждать, что методы вычислительной гидродинамики позволяют достоверно оценить параметры качки полупогружных платформ.

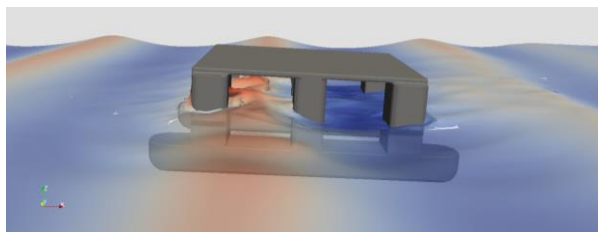


Рис. 3. Вторичные волны между стойками полупогружной платформы.

Расчёты также показали, что максимальные волновые нагрузки, действующие на стойки полупогружной платформы, не превышают 100 кПа. Распределение гидродинамических нагрузок на поверхности полупогружной платформы представлено на рис. 4. Наибольшие ударные воздействия испытывают внутренние поверхности стоек платформы.

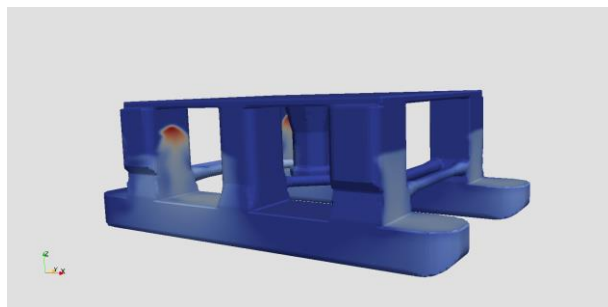


Рис. 4. Распределение гидродинамических нагрузок на поверхности полупогружной платформы.

Заключение

В настоящей работе были проведены исследования параметров вертикальной и килевой качек полупогружной платформы на регулярном волнении. Расчёты показали, что помимо двух основных пиков АЧХ вертикальной и килевой качек также наблюдаются промежуточные локальные максимумы амплитуд, обусловленные нелинейными волновыми процессами между стойками платформы. Значения основных пиков АЧХ (включая параметрический резонанс) вертикальной качки хорошо согласуются с аналитическими оценками. Максимальные волновые нагрузки наблюдаются на внутренних поверхностях стоек платформы. Работа выполнена в рамках опытно-конструкторской работы «Платформы-лёд-конструкция», выполняемой по государственному контракту

Литература

1. *Faltinsen, O*, 1990, M, Sea loads on ships and offshore structures, Cambridge University Press 328 p,
2. *M. Goodarzi, A. Yalpaniyan*, About the Free Surface Flow Simulation around a TLP. Development and Application of Oceanic Engineering. 2013. Vol. 2. Issue 1. P.25-31
3. *Sing-Kwan Lee, Hung-Pin Chien*. CFD Study of Deep Draft SemiSubmersible VIM. Proceedings of the Offshore Technology Conference-Asia, 2014. 25-28 March, Kuala Lumpur, Malaysia
4. *Ткаченко И.В., Тряскин Н.В.* Численное моделирование качки судна на регулярном волнении. Морские интеллектуальные технологии. 2013. № 3. С. 34-38
5. *Hirt, C.W., Nichols, B.D.* Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J. of Comp. Physics. 1981. V 39 (1). P 201-225.
6. *Rushe H.* Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flow at high phase fractions. PhD Thesis. 2002.
7. *Menter. F.* Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA J. 1994. 32. P. 1598-1605.

References

1. *Faltinsen, O*, 1990, M, Sea loads on ships and offshore structures, Cambridge University Press 328 p,
2. *M. Goodarzi, A. Yalpaniyan*, About the Free Surface Flow Simulation around a TLP. Development and Application of Oceanic Engineering. 2013. Vol. 2. Issue 1. P.25-31
3. *Sing-Kwan Lee, Hung-Pin Chien*. CFD Study of Deep Draft SemiSubmersible VIM. Proceedings of the Offshore Technology Conference-Asia, 2014. 25-28 March, Kuala Lumpur, Malaysia
4. *Tkachenko I.V., Tryaskin N.V.* Chislennoe modelirovanie kachki sudna na regul'yarnom volnenii. Morskie intellektual'nye texnologii. 2013. № 3. S. 34-38
5. *Hirt, C.W., Nichols, B.D.* Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J. of Comp. Physics. 1981. V 39 (1). P 201-225.
6. *Rushe H.* Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flow at high phase fractions. PhD Thesis. 2002.
7. *Menter. F.* Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA J. 1994. 32.

УДК 629.127:629.58

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДИНАМИКИ ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Никущенко Дмитрий Владимирович

доктор технических наук, доцент,

профессор кафедры теории корабля

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

e-mail: ndmitry@list.ru

Аннотация

При решении задач динамики подводных объектов перед исследователем встает вопрос о выборе системы координат, в которой будет производиться описание движения объекта. Однако в настоящее время в отечественной литературе отсутствует единая общепринятая система координат, которая могла бы быть рекомендована исследователю – в задачах статики, качки, управляемости наиболее популярные системы координат отличаются друг от друга. В результате уравнения движения также приобретают иной вид.

Попытка предложить универсальную систему координат, применимую для любых задач динамики подводных и надводных объектов была произведена в 1950 году обществом SNAME, результатом чего стало появление системы координат, широко используемой в зарубежной литературе, однако мало распространенной в нашей стране.

В настоящей работе производится сравнение наиболее применимой в отечественной литературе системы координат с системой SNAME, приводятся уравнения движения в двух этих системах, а также зависимости для пересчета результатов из одной системы в другую.

Ключевые слова: подводный объект, подводный аппарат, управляемость, маневренность, уравнения движения, система координат, присоединенные массы

ON REFERENCE FRAMES USED IN INVESTIGATIONS OF UNDERWATER VEHICLES DYNAMICS

Nikushchenko Dmitry Vladimirovich

the professor, Dr.Sci.Tech.,

the professor of DEPARTMENT OF SHIP HYDRODYNAMICS,

STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG

Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation

e-mail: ndmitry@list.ru

Abstract

In process of investigation of a motion of an underwater vehicle it is necessary to select first a reference frame, where the motion will be described and simulated. But at present there is not universal reference frame, which could be recommended to a researcher as standard coordinate system, because in all areas of underwater vehicle's dynamics different coordinate systems are usually used. By this reason problems arise because equations of motion depend on reference frames.

An attempt to develop an universal reference frame which could be used in solution of all problems of dynamics was done in 1950 year by SNAME. As a result a reference frame was offered which is widely used abroad, but not so famous in Russia.

In the present article comparison of two coordinate systems (usually used in our country and SNAME system) was made, equations of motion in the both reference frames and dependences to convert results from one of them to the other one are presented.

Key words: underwater vehicle, equations of motion, maneuverability, steeringability, reference frames, coordinate system, added masses, virtual masses

Введение

При моделировании динамики подводных объектов (ПО) перед исследователем встает вопрос о выборе системы координат (СК), которая будет использоваться для описания его движения. Несмотря на внешнюю простоту этот вопрос отнюдь не очевиден, так как по настоящее время в отечественной литературе не существует единой общепринятой системы координат, используемой во всех задачах динамики ПО.

Положение осложняется еще и тем, что различными авторами используются как левые, так и правые системы, варьируется и положение начала координат. Все сказанное часто создает сложности при сравнении постановок и результатов исследований разных авторов.

В настоящей работе рассмотрены наиболее распространенные системы координат, используемые в задачах динамики ПО.

1. Системы координат, применяемые при исследовании динамики ПО

При исследовании динамики подводных объектов в нашей стране традиционно используют системы координат, приведенные на рис. 1: неподвижную систему (ξ, ζ, η) и связанную (подвижную) (x, y, z) [5]. Связанная СК, изображенная на рис. 1 в дальнейшем будет называться корабельной. Положение ПО в пространстве задается с помощью трех координат и трех углов, определяющих ориентацию подвижной системы координат относительно неподвижной. Они носят название угла дифферента ψ (угол поворота относительно оси z), угла курса φ (угол поворота относительно оси y), и угла крена θ (угол поворота относительно оси x). Положительным направлением изменения углов обычно принимается изменение против часовой стрелки.

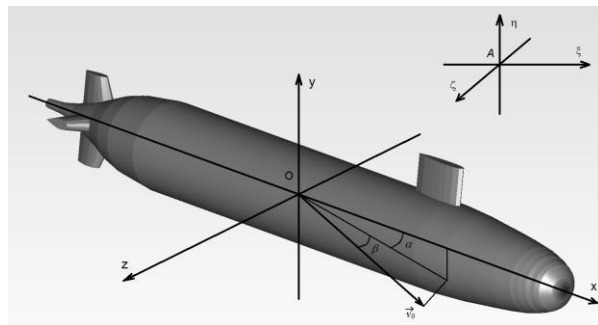


Рис. 1. Корабельная система координат

Кроме того, используется также полуподвижная СК, локализованная в той же точке, что и связанная, но оси ее параллельны осям неподвижной СК.

В 1950 году обществом SNAME была предложена система координат, получившая значительное распространение в зарубежной литературе. Она тоже правая, однако ось z направлена вниз, а ось y – на правый борт (рис. 2).

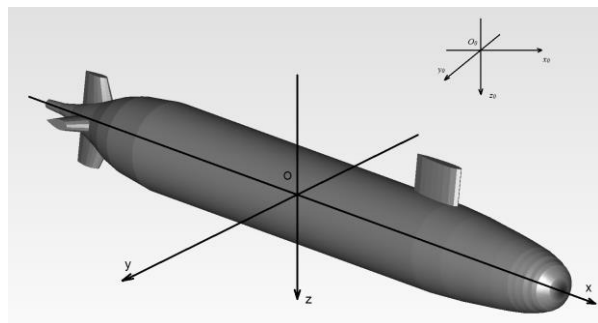


Рис. 2. Система координат SNAME

Помимо направления осей в этих двух СК отличаются обозначения углов Эйлера. В табл. 1 и 2 приводятся обозначения компонент скоростей и углов Эйлера для обеих СК.

Таблица 1

Обозначения в корабельной системе

Ось	Направление оси	Компонента скорости	Угол поворота	Название	Угловая скорость
x	вперед	v_x	θ	Угол крена	ω_x
y	вверх	v_y	φ	Угол курса	ω_y
z	на правый борт	v_z	ψ	Угол дифферента	ω_z

Таблица 2

Обозначения в системе SNAME

Ось	Направление оси	Скорость	Угол поворота	Название	Угловая скорость
x	вперед	u	ϕ	Угол крена	p
y	на правый борт	v	θ	Угол дифферента	q
z	вниз	w	ψ	Угол курса	r

Полная скорость в корабельной системе записывается как $v_0^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$, а в системе SNAME - $U^2 = u^2 + v^2 + w^2$.

Таким образом, на основе табл. 1 и 2 можно получить правила пересчета из одной системы в другую путем замены переменных (табл. 3)

Таблица 3

Правила замены координат и углов в разных СК

КСК	SNAME	КСК	SNAME
x	x	θ	φ
y	-z	φ	-ψ
z	y	ψ	θ

Также надо учитывать, что $v_x = \dot{x}$, $\omega_x = \dot{\theta}$, и т.д.

Для приведенной угловой скорости вводятся такие обозначения: $\bar{\omega}_z = \omega_z L / v_0$ или $\gamma = rL / U$, L – характерная длина ПО.

Направление вектора скорости в связанной СК задается с помощью углов атаки α (угол между продольной осью и проекцией вектора скорости на диаметральной плоскость) и дрейфа β (угол между вектором скорости и диаметральной плоскостью). В этой связи также вводят в рассмотрение скоростную СК (x_c, y_c, z_c), продольная ось которой сонаправлена вектору скорости, а две другие – перпендикулярны ей. Так как в рассматриваемых СК вертикальная и поперечная оси направлены по-разному, выражения для проекций скорости на оси связанной системы координат отличаются. Так, для корабельной СК:

$$v_x = v_0 C \alpha C \beta, v_y = -v_0 S \alpha C \beta, v_z = v_0 S \beta,$$

где C и S – синус и косинус угла соответственно. В системе SNAME:

$$u = UC \alpha C \beta, v = -US \beta, w = US \alpha C \beta,$$

Точкой приложения этих систем, например, может быть центр масс (ЦМ) ПО, тогда оси связанной СК совпадут с центральными осями инерции, что позволит не учитывать перекрестные моменты инерции. Однако в процессе эксплуатации ПО положение ЦМ может изменяться в силу расхождения, перемещения, приема грузов. С другой стороны, положение центра величины (ЦВ) в подводном положении изменяется мало, а находится он вблизи ЦМ. Потому выбор ЦВ в качестве начала координат вполне обоснован. Можно использовать и другие локализации систем координат, например, геометрический центр корпуса (точку пересечения диаметральной плоскости, горизонтальной плоскости симметрии и плоскости мидель-шпангоута), и др.

Помимо рассмотренных СК применяются и другие. Например, для описания динамики надводных объектов в нашей стране чаще всего используют СК, в которой ось z направлена вверх, а y – на правый борт [6]. Эта система левая, положительное направление изменения углов принимается по часовой стрелке. В ряде зарубежных работ используется правая СК в которой ось z направлена вверх, а ось y – на левый борт [7], а при численном моделировании ПО часто используется СК, в которой ось x направлена

назад, ось z – вверх, а y – на правый борт (например, [10]).

Некоторые другие полезные обозначения в двух рассматриваемых СК приведены в табл. 4.

Таблица 4

Некоторые обозначения в разных СК

Величина	Корабельная СК	SNAME
Центр величины	C	CB
Центр масс	G	CG
Метацентр	M	CM
Метацентрическая высота	h	GM
Площадь смоченной поверхности	Ω	S
Объемное водоизмещение	V	∇

2. Преобразование координат

При повороте подвижной системы координат новое положение ПО может быть получено с помощью матрицы преобразования R , которая получается путем поворота системы последовательно относительно каждой из осей от z до x :

$$\bar{x} = R \bar{x}'$$

где $\bar{x} = x_j \bar{e}_j$, x_j – компонента радиус-вектора, \bar{x}' – новое положение системы, \bar{e}_j – орт оси координат.

Матрица преобразования координат для случая корабельной системы координат:

$$R = \begin{pmatrix} C \varphi C \psi & \begin{pmatrix} S \varphi C \psi S \theta - \\ -S \psi C \theta \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} S \varphi C \psi C \theta + \\ + S \theta S \psi \end{pmatrix} \\ C \varphi S \psi & \begin{pmatrix} S \varphi S \psi S \theta + \\ + C \psi C \theta \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} S \varphi S \psi C \theta - \\ -C \psi S \theta \end{pmatrix} \\ -S \varphi & C \varphi S \theta & C \varphi C \theta \end{pmatrix},$$

Так как обе рассматриваемые системы правые, и направления положительного изменения углов совпадают, матрица преобразования координат для случая SNAME будет иметь такой же вид, как и корабельная, однако обозначения углов поменяются [8]:

$$R_{SNAME} = \begin{pmatrix} C\psi C\theta & \begin{pmatrix} C\psi S\phi S\theta - \\ -C\phi S\psi \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} C\psi S\theta C\phi + \\ +S\phi S\psi \end{pmatrix} \\ S\psi C\theta & \begin{pmatrix} S\phi S\psi S\theta + \\ +C\psi C\phi \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} S\theta S\psi C\phi - \\ -C\psi S\phi \end{pmatrix} \\ -S\theta & C\theta S\phi & C\theta C\phi \end{pmatrix}$$

Матрицы R и R_{SNAME} обладают свойством ортогональности, т.е. $\det R = \det R_{SNAME} = 1$, $R^{-1} = R^T$, $R_{SNAME}^{-1} = R_{SNAME}^T$.

Если углы сравнительно малы, то можно использовать следующие упрощенные матрицы:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & -\delta\psi & \delta\phi \\ \delta\psi & 1 & -\delta\theta \\ -\delta\phi & \delta\theta & 1 \end{pmatrix}, R_{SNAME} = \begin{pmatrix} 1 & -\delta\psi & \delta\theta \\ \delta\psi & 1 & -\delta\phi \\ -\delta\theta & \delta\phi & 1 \end{pmatrix},$$

в которых символом δ обозначается приращение соответствующего угла.

Следует указать, что в ряде работ используется такая матрица преобразования для корабельной системы [2]:

$$R = \begin{pmatrix} C\phi C\psi & \begin{pmatrix} -C\phi S\psi C\theta + \\ +S\phi S\theta \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} C\phi S\psi S\theta + \\ +C\theta S\phi \end{pmatrix} \\ S\psi & C\psi C\theta & -C\psi S\theta \\ -S\phi C\psi & \begin{pmatrix} S\phi S\psi C\theta + \\ +C\phi S\theta \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -S\phi S\psi S\theta + \\ +C\phi C\theta \end{pmatrix} \end{pmatrix}.$$

Ее отличие от рассмотренных выше обусловлено другим порядком поворота осей: сперва происходит поворот относительно вертикальной (второй) оси y , затем – относительно боковой оси z , и, наконец, относительно продольной оси x .

3. Присоединенные массы в разных системах координат

Известно, что при движении тела в жидкости часть его кинетической энергии расходуется на вовлечение жидкости в движение. Это приводит к появлению в уравнениях движения так называемых присоединенных масс [1]. В работе [4] показано, что все присоединенные массы образуют собой тензор второго ранга, что позволяет записать кинетическую энергию тела, движущегося в жидкости, следующим образом:

$$T = \frac{1}{2} \vec{v}_0 \cdot (\underline{M} + \underline{M}^*) \cdot \vec{v}_0 + \frac{1}{2} \vec{\omega} \cdot (\underline{l}_0 + \underline{l}_0^*) \cdot \vec{\omega} + \vec{\omega} \cdot (\underline{\Lambda}^T + \underline{\Lambda}^{*T}) \cdot \vec{v}_0,$$

где $\underline{M} = M \cdot \underline{E}$ - тензор массы M ПО, $\underline{E} = \delta_{ij} \vec{e}_i \vec{e}_j$ - единичный тензор; $\underline{\Lambda} = M \cdot x_{gk} \varepsilon_{ijk} \vec{e}_i \otimes \vec{e}_j$, $\underline{\Lambda} = -\underline{\Lambda}^T$ - тензор статических моментов, x_{gk} - координаты ЦМ ПО, ε_{ijk} - тензор Леви-Чивита; $\underline{l}_0 = -\sum_i (m_i \vec{r}_i \otimes \vec{r}_i - m_i \vec{r}_i^2 \underline{E})$ - тензор моментов

инерции; $M_{ij}^* = -\rho \iint_S \varphi_i \frac{\partial \varphi_j}{\partial n} dS$, $\Lambda_{ij}^* = -\rho \iint_S \chi_j \frac{\partial \varphi_i}{\partial n} dS$,

$I_{ij}^* = -\rho \iint_S \chi_i \frac{\partial \chi_j}{\partial n} dS$, $i, j = 1, 2, 3$, - тензоры присо-

единенных масс, статических моментов и моментов инерции, причем тензоры \underline{M}^* и \underline{l}_0^* - симметричные, а $\underline{\Lambda}^*$ - антисимметричный; φ_i, χ_j - единичные потенциалы, откуда потенциал скорости $\Phi = v_i \varphi_i + \omega_j \chi_j$, v_i и ω_j - компоненты поступательной и угловой скоростей соответственно.

Традиционно в отечественной литературе обобщенные присоединенные массы обозначаются символом λ_{ij} , где $i, j = 1..6$, если i - направление движения ПО, то j - направление вызванного движения жидкости.

В системе SNAME принят иной принцип обозначения, который приводит к такой матрице:

$$\begin{pmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{pmatrix}$$

4. Уравнения движения ПО

Уравнения движения ПО в самом общем виде можно записать следующим образом [5]:

$$\begin{aligned} X_{uH1} + X_A &= X, & M_{XuH1} + M_{XA} &= M_x, \\ Y_{uH1} + Y_A &= Y, & M_{YuH1} + M_{YA} &= M_y, \\ Z_{uH1} + Z_A &= Z, & M_{ZuH1} + M_{ZA} &= M_z, \end{aligned} \tag{1}$$

где X_{uH1} - инерционная составляющая продольной силы на корпусе ПО, X_A - инерционная составляющая продольной силы, обусловленная движением среды, X - продольная составляющая сил неинерционной природы, и т.д. Для сил и моментов в системе SNAME приняты следующие обозначения: $\vec{F} = \vec{i}X + \vec{j}Y + \vec{k}Z$, $\vec{M} = \vec{i}K + \vec{j}M + \vec{k}N$.

Силы и моменты собственной инерции корпуса ПО в системе SNAME компонентной форме:

$$\begin{aligned} X_{uH1} &= m\dot{u} + m(qw - rv) - \\ &\quad - m(x_g(q^2 + r^2) - y_g(pq - \dot{r}) - z_g(pr + \dot{q})) \\ Y_{uH1} &= m\dot{v} + m(ru - pw) - \\ &\quad - m(-x_g(qp + \dot{r}) + y_g(r^2 + p^2) - z_g(qr - \dot{p})) \\ Z_{uH1} &= m\dot{w} + m(pv - qu) - \\ &\quad - m(-x_g(rp - \dot{q}) - y_g(rq + \dot{p}) + z_g(p^2 + q^2)) \\ K_{uH1} &= I_x \dot{p} + m(I_z - I_y)qr - \\ &\quad - I_{xy}(\dot{q} - pr) - I_{xz}(\dot{r} + pq) - I_{yz}(q^2 - r^2) + \\ &\quad + m(y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)) \end{aligned}$$

$$M_{ун1} = I_y \dot{q} + m(I_x - I_z)rp - I_{yx}(\dot{p} + qr) - I_{yz}(\dot{r} - qp) - I_{zx}(r^2 - p^2) + m(z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp))$$

$$N_{ун1} = I_z \dot{r} + m(I_y - I_x)pq - I_{zx}(\dot{p} - rq) - I_{zy}(\dot{q} + rp) - I_{xy}(p^2 - q^2) + m(x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq))$$

Аналогичные выражения для КСК получаются из этих выражений с помощью замены переменных согласно табл. 3.

Полное представление инерционных составляющих для системы SNAME можно найти в работе [8], а для КСК – в [5]. Ниже будет рассмотрен случай ПО, симметричного относительно двух плоскостей – ХОУ и ХОZ. Количество независимых присоединенных масс в этом случае сокращается до 8 (все диагональные, λ_{26} (Y_f) и λ_{35} (Z_q)). Тогда матрица присоединенных масс в системе SNAME будет выглядеть так:

$$\begin{pmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & Y_f \\ 0 & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & Z_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{\dot{w}} & 0 & M_q & 0 \\ 0 & N_{\dot{v}} & 0 & 0 & 0 & N_f \end{pmatrix}$$

откуда

$$X_A = X_{\dot{u}}\dot{u} + Z_{\dot{w}}wq + Z_qq^2 - Y_{\dot{v}}vr - Y_f r^2,$$

$$Y_A = Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_f \dot{r} + X_{\dot{u}}ur - Z_{\dot{w}}wp - Z_qpq,$$

$$Z_A = Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_q\dot{q} - X_{\dot{u}}uq + Y_{\dot{v}}vp + Y_f rp,$$

$$K_A = K_{\dot{p}}\dot{p},$$

$$M_A = M_{\dot{w}}\dot{w} + M_q\dot{q} - (Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}})uw - Y_f vp + (K_{\dot{p}} - N_f)rp - Z_quq,$$

$$N_A = N_{\dot{v}}\dot{v} + N_f \dot{r} - (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})uv + Z_qwp - (K_{\dot{p}} - M_q)pq + Y_f ur.$$

Аналогичные выражения для КСК можно получить путем замены переменных согласно табл. 3, учитывая, что $Y_f = \lambda_{26}$, $Z_q = \lambda_{35}$, $M_{\dot{w}} = \lambda_{53}$, $N_{\dot{v}} = \lambda_{62}$, и т.д.

Подставляя полученные выражения в систему (1) можно получить общую форму уравнений движения. Если СК локализована в ЦМ ПО, а оси ее являются главными осями инерции, система уравнений движения сильно упрощается. В обозначениях SNAME ее можно записать так:

$$(m + X_{\dot{u}})\dot{u} + m(qw - rv) + Z_{\dot{w}}wq + Z_qq^2 - Y_{\dot{v}}vr - Y_f r^2 = X,$$

$$(m + Y_{\dot{v}})\dot{v} + m(ru - pw) + Y_f \dot{r} + X_{\dot{u}}ur - Z_{\dot{w}}wp - Z_qpq = Y,$$

$$(m + Z_{\dot{w}})\dot{w} + m(pv - qu) + Z_q\dot{q} - X_{\dot{u}}uq + Y_{\dot{v}}vp + Y_f rp = Z,$$

$$(I_x + K_{\dot{p}})\dot{p} + m(I_z - I_y)qr = K,$$

$$(I_y + M_q)\dot{q} + m(I_x - I_z)rp + M_{\dot{w}}\dot{w} - (Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}})uw - Y_f vp + (K_{\dot{p}} - N_f)rp - Z_quq = M,$$

$$(I_z + N_f)\dot{r} + m(I_y - I_x)pq + N_{\dot{v}}\dot{v} - (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})uv + Z_qwp - (K_{\dot{p}} - M_q)pq + Y_f ur = N.$$

Аналогичная система в КСК:

$$(m + \lambda_{11})\dot{v}_x + m(\omega_y v_z - \omega_z v_y) + \lambda_{33}v_z \omega_y + \lambda_{35}\omega_y^2 - \lambda_{22}v_y \omega_z - \lambda_{26}\omega_z^2 = R_x,$$

$$(m + \lambda_{22})\dot{v}_y + m(\omega_z v_x - \omega_x v_z) + \lambda_{26}\omega_z + \lambda_{11}v_x \omega_z - \lambda_{33}v_z \omega_x - \lambda_{35}\omega_x \omega_y = R_y,$$

$$(m + \lambda_{33})\dot{v}_z + m(\omega_x v_y - \omega_y v_x) + \lambda_{35}\omega_y + \lambda_{22}v_y \omega_x + \lambda_{26}\omega_x \omega_z - \lambda_{11}v_x \omega_y = R_z,$$

$$(I_x + \lambda_{44})\dot{\omega}_x + m(I_z - I_y)\omega_y \omega_z + (\lambda_{26} + \lambda_{35})(v_y \omega_y - v_z \omega_z) + (\lambda_{33} - \lambda_{22})v_y v_z + (\lambda_{66} - \lambda_{55})\omega_y \omega_z = M_x,$$

$$(I_y + \lambda_{55})\dot{\omega}_y + m(I_x - I_z)\omega_z \omega_x + \lambda_{35}(\dot{v}_z - v_x \omega_y) - \lambda_{26}v_y \omega_x + (\lambda_{11} - \lambda_{33})v_x v_z + (\lambda_{44} - \lambda_{66})\omega_x \omega_z = M_y,$$

$$(I_z + \lambda_{66})\dot{\omega}_z + m(I_y - I_x)\omega_x \omega_y + \lambda_{26}(\dot{v}_y + v_x \omega_z) + \lambda_{35}v_z \omega_x + (\lambda_{22} - \lambda_{11})v_x v_y + (\lambda_{55} - \lambda_{44})\omega_x \omega_y = M_z.$$

5. Силы и моменты неинерционной природы, действующие на ПО

Правые части уравнений движения представляют собою силы и моменты, которые обычно разделяются на гидростатические (силы веса и плавучести), гидродинамические, движительно-рулевого комплекса (ДРК), аэродинамические, ветроволнового воздействия, и др.

Подход к обозначению составляющих правых частей в обеих СК также отличается. В частности, в отечественной литературе коэффициенты гидродинамических сил и моментов традиционно разделяются на позиционные и вращательные, например, следующим образом [5]:

$$c_i = \frac{R_i}{\frac{\rho V_0^2}{2} V^{2/3}} = c_i^0 + c_i^{\alpha} \alpha + c_i^{\alpha\alpha} |\alpha| + c_i^{\beta} \beta + c_i^{\beta\beta} |\beta| +$$

$$+ c_i^{\omega_j} \omega_j + c_i^{\omega_j \omega_j} |\omega_j| + c_i^{\alpha \omega_j} \alpha \omega_j + c_i^{\beta \omega_j} \beta \omega_j + c_i^{\alpha \beta} \alpha \beta + O^3,$$

где c_i^0 – проекции сил при нулевых значениях углов атаки и дрейфа; $c_i^{\mu} = \frac{\partial c_i}{\partial \mu}$, $c_i^{\mu\nu} = \frac{\partial^2 c_i}{\partial \mu \partial \nu}$,

$\mu, \nu = \{\alpha, \beta, \omega_j\}$, $i, j = 1, 2, 3$; V – водоизмещение ПО, V_0 – поступательная скорость центра масс ПО. Аналогичное разложение записывается и для ко-

эффициентов момента $m_i = M_i / \frac{\rho V_0^2}{2} V$. Те составляющие, которые зависят только от углов атаки и дрейфа называются позиционными, те, которые зависят также и от угловой скорости называются вращательными [5]. Количество членов ряда может колебаться в широких пределах от трех до 50 (например, [3; 9]).

В системе SNAME общая структура неинерционной силы в отсутствии ветра и волнения записывается, например, следующим образом:

$$X = X_{HS} + X_{cs} + X_{hyd} + X_{prop},$$

где HS – гидростатическая составляющая, cs – управляющее воздействие, hyd – гидродинамическая составляющая, $prop$ – пропульсивная сила. Безразмерные значения сил получаются ана-

логично: $X' = X / \frac{\rho U^2}{2} l^2$, l – характерная длина.

Если принять, что $l = V^{1/3}$, то эта величина будет равна коэффициенту сопротивления $X' = c_x$. Для

кренящего момента $K' = K / \frac{\rho U^2}{2} l^3$, и т.д.

Гидродинамическая сила раскладывается в ряд аналогичным образом:

$$Y_{hyd} = Y_{vv} v^2 + Y_{uv} uv + Y_{rr} r^2 + Y_{rv} rv \dots,$$

где $Y_{vv} = \frac{\partial^2 Y}{\partial v^2}$, $Y_{rv} = \frac{\partial^2 Y}{\partial r \partial v}$, и т.д. Отсюда, напри-

мер, $X_{uu} = \frac{\partial^2 Y}{\partial v^2} = -1/2 (\rho S) c$, c – коэффициент

сопротивления, S – характерная площадь,

$Y_{rv} = \frac{\partial^2 Y}{\partial r \partial v} = -\frac{\partial b}{\partial r \partial \beta} \frac{\rho U}{2} S$, переходя к безразмер-

ным величинам получаем $Y_{rv}' = -\frac{\partial b}{\partial r \partial \beta} = c_z^{\beta \omega_z}$.

Более подробно об определении этих коэффициентов можно прочитать в [10, 12].

Следует учитывать, что при экспериментальном определении сил и моментов гидродинамические силы и моменты определяются вместе с инерционными составляющими которые могут вычитаться из суммарных значений, а могут даваться в виде суммы. В этом случае, во избежание двойного учета инерционных составляющих сил и моментов со стороны жидкости, следует перенести эти члены в правые части уравнений.

Заключение

Таким образом, в настоящей статье рассмотрены основные свойства двух наиболее употребительных в задачах динамики ПО систем координат – корабельной, традиционно используемой в отечественной литературе, и системы SNAME, широко распространенной на западе. Преимуществами последней являются ее универсальность и более удобный отсчет изменения углов (например, положительным направлением изменения угла курса будет поворот на правый борт).

Литература

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. — М.: Наука, 1987. — 840 с.
2. Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А. Навигация и управление движением судов. — СПб.: Элмор, 2002. — 360 с.
3. Митрофанов Е.Ф., Негашев С.В., Стамбровская А.А. Корректировка структурных выражений для описания гидродинамических сил, действующих на подводные объекты // Труды ЦНИИ им.акад.А.Н.Крылова. 2000. № 10 (294). — С. 34-39.
4. Павловский В.А., Никущенко Д.В. К выводу уравнений движения подводного аппарата // Вестн.С.-Петербург ун-та.Сер.10. 2007. № 2. — С. 60-64.
5. Рождественский В.В. Динамика подводной лодки. 1 — Л.: Судостроение, 1970 – 352с.
6. Соболев Г.В. Управление корабля и автоматизация судовождения. — Л.: Судостроение, 1976. — 477с.
7. ISIS-CFD v3.1. Theoretical manual. — Nantes: ECN, 2013. — 69 p.
8. Fossen T.I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. — Chichester, UK: Wiley, 2011. — 575 p.
9. Gertler M., Hagen G.R. Standart Equations of Motion for Submarine Simulation. — Washington DC, 1967. — 42 p.
10. Vaz G., Toxopeus S., Holmes S. Calculation of Manoeuvring Forces on Submarines Using Two Viscous-Flow Solvers // OMAE2010, Shanghai, China, 2010, pp. 1-13.

References

- Loytsyanskiy L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza (Fluid and gas mechanics), Moscow, Nauka, 1987. 840 p.
- Lukomskiy Yu.A., Peshekhonov V.G., Skorokhodov D.A. Navigatsiya i upravlenie dvizheniem sudov (Navigation and steering of ships), St. Petersburg, Elmor, 2002. 360 p.
- Mitrofanov E.F., Negashev S.V., Stambrovskaya A.A. Korrektirovka strukturnykh vyrazheniy dlya opisaniya gidrodinamicheskikh sil, deystvuyushchikh na podvodnye ob"ekty (Correction of equations to describe hydrodynamical forces act to underwater vehicles: Proceedings of Krylov Institute, № 10 (294)), St. Petersburg, 2000. pp. 34-39.
- Pavlovskiy V.A., Nikushchenko D.V. K vyvodu uravneniy dvizheniya podvodnogo apparata (On development of underwater vehicle's equations of motion: Vestnik of St. Petersburg University, Series 10, №2), St. Petersburg, 2007. pp. 60-64.
- Rozhdestvenskiy V.V. Dinamika podvodnoy lodki (Submarine dynamics, Vol. 1), Leningrad, Sudostroenie, 1970. 352 p.
- Sobolev G.V. Upravlyaemost' korablya i avtomatizatsiya sudovozhdeniya (Maneuverability of a ship and automation of navigation), Leningrad, Sudostroenie, 1976. 477 p.

ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕСТКОПЛАСТИЧЕСКОЙ БАЛКИ В ВИДЕ НЕСИММЕТРИЧНОГО ДВУТАВРА ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ НАГРУЖЕНИИ

Коршунов Владимир Александрович

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

Пономарев Дмитрий Александрович

аспирант, инженер-исследователь научно-исследовательской части
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: dmitriy.smtu@gmail.com

Родионов Александр Александрович

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

Аннотация

В данной статье рассматриваются предельные состояния жесткопластической балки тонкостенного поперечного сечения в виде несимметричного двутавра под действием вертикального изгибающего момента, продольной силы и перерезывающей силы. Не учитывается кручение и изгиб в горизонтальной плоскости и пренебрегается эффектами локальной потери устойчивости и деформационного упрочнения.

Проанализирован вариант несимметричного двутаврового сечения, образованного из составляющих элементов: свободного пояса, стенки и присоединенного пояса - изготовленных из материалов, различающихся значениями предела текучести. Рассматриваются предельные состояния сечения балки при однокомпонентном и комбинированном нагружении. Особое внимание уделено исследованию распределения напряжений по сечению балки при совместном воздействии изгибающего момента и продольной силы при различных положениях пластической нейтральной оси.

Учет влияния перерезывающей силы на предельное состояние сечения при сложном изгибе выполнен в предположении, что перерезывающая сила воспринимается только стенкой.

Получены явные аналитические зависимости предельных кривых и поверхностей, которые могут быть использованы для анализа предельного состояния балочных моделей конструкций.

Ключевые слова: предельное состояние, пластические деформации, сложный изгиб, перерезывающая сила, предельная кривая, параметры изгиба балок.

ULTIMATE STATE OF AN ASYMMETRIC DOUBLE TEE STIFF-PLASTIC BEAM SECTION UNDER COMBINED LOADING

Korshunov Vladimir Aleksandrovich

Candidate of technical Sciences, the senior teacher of Department of structural mechanics
State Marine Technical University. 3, Lotsmanskaya Str., St.Petersburg, 190008 Russia
e-mail: vovan_kor@mail.ru

Ponomarev Dmitriy Aleksandrovich

Graduate student, engineer-researcher of Research part
State Marine Technical University. 3, Lotsmanskaya Str., St.Petersburg, 190008 Russia
e-mail: dmitriy.smtu@gmail.com

Rodionov Aleksandr Aleksandrovich

the professor, Dr.Sci.Tech., the professor of Department of structural mechanics
State Marine Technical University. 3, Lotsmanskaya Str., St.Petersburg, 190008 Russia
e-mail: rodionovsmk@yandex.ru

Abstract

This paper considers ultimate state of thin-walled stiff-plastic beams priest-river-section in the form of an asymmetrical I-beam under the action of vertical bending moment, axial force and shearing force. Torsion and bending in the horizontal plane and neglects the effects of local loss of sustainability and strain hardening are not taken into account. A variant of the asymmetric I-section formed from components of a elements: free girdle wall and attached belt is made of materials differing values of the yield strength are analyzed. The ultimate states of section of the beam with one-component and combined loading are discussed. Special attention is paid to the study of the stress distribution over the cross section of the beam under the combined action of the bending moment and the longitudinal force at different positions of the plastic neutral axis. Taking into account the influence of shearing forces at ultimate limit States section for complex bending is performed under the assumption that only the wall perceives the shearing force. Obtain an explicit analytical dependence of the limiting curves and surfaces that can be used to analyze the limit state of beam patterns designs.

Keywords: ultimate state, plastic deformation, compound bending, shear force, ultimate curve, bending parameters of beams.

Введение

В традиционном методе проектирования стальных конструкций по допускаемым напряжениям обычно в качестве критерия используется начальный предел текучести материала. Однако, большинство стальных конструкций при появлении в локальных зонах напряжений текучести в состоянии выдержать некоторое дальнейшее увеличение нагрузки, поскольку вследствие пластичности стали внутренние напряжения перераспределяются. Альтернативный подход к проектированию - по предельному состоянию - основан на максимальной нагрузке - несущей способности или предельной прочности, базируется на теории пластичности. Анализ поведения конструкций при нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями весьма сложен.

Поэтому большое значение приобретают методы приближенной оценки нагрузок, соответствующих предельному состоянию.

Здесь большую степень эффективности продемонстрировал прием, основанной на гипотезе мгновенного раскрытия пластического шарнира, в которой предполагается, что сечение либо деформируется упруго, либо в нем образуется шарнир текучести. Это позволяет комбинировать аппарат теории предельного равновесия и идеальную упругопластическую модель поведения материала.

В поперечном сечении балки в общем случае действуют следующие обобщенные усилия: изгибающий момент в вертикальной плоскости, изгибающий момент в горизонтальной плоскости, крутящий момент, перерезывающая сила в вертикальной плоскости, перерезывающая сила в горизонтальной плоскости и продольная сила.

Для балок в составе корпусных конструкций, работающих вместе с присоединенным пояском пластины, рассматривается поперечное сечение в виде тонкостенного несимметричного двутавра.

При оценке предельной прочности рассматриваемых балок полагается, что эффекты локальной потери устойчивости и деформационного упрочнения не имеют существенного значения, также не учитывается кручение и изгиб в горизонтальной плоскости [1].

Рассматривается ситуации, когда в поперечном сечении балки действуют: изгибающий момент (в вертикальной плоскости), продольная и перерезывающая сила (в вертикальной плоскости) (рис.1). Каждое из перечисленных усилий в отдельность, а также их комбинация может привести сечение в предельное состояние.

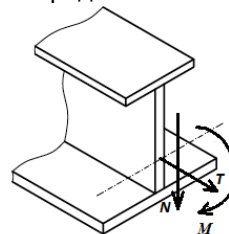


Рис.1. Обобщенные усилия, действующие в поперечном сечении балки.

Схема поперечного сечения балки несимметричного двутаврового профиля и его геометрические размеры представлены на рисунке 2.

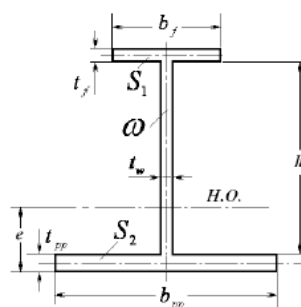


Рис.2. Обозначения размеров поперечного сечения балки в форме несимметричного двутавра.

- b_f – ширина свободного пояса;
- t_f – толщина свободного пояса;
- h – высота стенки;
- t_w – толщина стенки;
- b_{pp} – ширина присоединенного пояса;
- t_{pp} – толщина присоединенного пояса;
- $S_1 = b_f t_f$ – площадь свободного пояса;

$\omega = ht_w$ – площадь стенки;

$S_2 = b_{pp}t_{pp}$ – площадь присоединенного пояска;

$F = S_1 + S_2 + \omega$ – полная площадь сечения.

Вычисление геометрических характеристик сечения представлено в таблице 1.

Если все связи балки изготовлены из одного материала, то предел текучести обозначим σ_T . Возможен и более общий случай несимметричного двутаврового сечения, у которого свойства материала присоединенного пояска, стенки и свободного пояска различны, т.е. обладают различными значениями предела текучести:

σ_{Tp} – предел текучести материала присоединенного пояска;

$\sigma_{T\omega}$ – предел текучести материала стенки;

σ_{Tf} – предел текучести материала свободного пояска.

В таком случае введем эквивалентные напряжения текучести:

$$\sigma_{Te} = \frac{S_1 \cdot \sigma_{Tf} + \omega \cdot \sigma_{T\omega} + S_2 \cdot \sigma_{Tp}}{S_1 + \omega + S_2}. \quad (1.1)$$

Положение нейтральной оси от оси сравнения (наружная поверхность присоединенного пояска):

1. $e = \frac{B}{A}$ - отстояние фибры присоединенного пояска от НО;

2. $e_1 = h + t_{pp} + t_f - e$ - отстояние фибры свободного пояска от НО;

Момент инерции поперечного сечения относительно нейтральной оси

$$I = C + c - \frac{B^2}{A}.$$

Таблица 1

Вычисление геометрических характеристик поперечного сечения несимметричного двутавра

Наименование связи	Площадь сечения F_i	Отстояние от оси сравнения z_i	Статический момент $F_i z_i$	Момент инерции $F_i (z_i)^2$	Собственный момент инерции
Свободный поясок	S_1	$h + t_{pp} + \frac{t_f}{2}$	$S_1 \cdot \left(h + t_{pp} + \frac{t_f}{2} \right)$	$S_1 \cdot \left(h + t_{pp} + \frac{t_f}{2} \right)^2$	$S_1 \frac{t_f^2}{12}$
Стенка	ω	$\frac{h}{2} + t_{pp}$	$\omega \left(\frac{h}{2} + t_{pp} \right)$	$\omega \left(\frac{h}{2} + t_{pp} \right)^2$	$\omega \frac{h^2}{12}$
Присоедин. поясок	S_2	$\frac{t_{pp}}{2}$	$S_2 \left(\frac{t_{pp}}{2} \right)$	$S_2 \left(\frac{t_{pp}}{2} \right)^2$	$S_2 \frac{t_{pp}^2}{12}$
Сумма	$S_1 + S_2 + \omega$		$S_1 \cdot \left(h + t_{pp} + \frac{t_f}{2} \right) + \omega \left(\frac{h}{2} + t_{pp} \right) + S_2 \cdot \left(\frac{t_{pp}}{2} \right)$	$S_1 \cdot \left(h + t_{pp} + \frac{t_f}{2} \right)^2 + \omega \left(\frac{h}{2} + t_{pp} \right)^2 + S_2 \cdot \left(\frac{t_{pp}}{2} \right)^2$	$S_1 \frac{t_f^2}{12} + \omega \frac{h^2}{12} + S_2 \frac{t_{pp}^2}{12}$
	A		B	C	c

1. Предельные состояния сечения

1.1. Однокомпонентное нагружение

Распределение напряжений в сечении при достижении предельных состояний в условиях однокомпонентного нагружения показано на рис. 3.

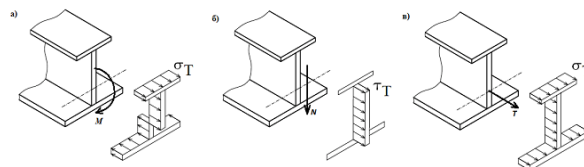


Рис. 3. Распределение напряжений по поперечному сечению балки в предельных состояниях различных ти-

пов: а) изгибный пластический шарнир; б) сдвиговой пластический шарнир; в) продольный пластический шарнир.

Если в сечении действует только изгибающий момент, то его предельное значение достигается, когда все нормальные напряжения в сечении принимают значения, равные пределу текучести материала (рис.3-а) [2,3]. Такое предельное состояние принято называть изгибный пластический шарнир.

Предельное значение изгибающего момента определяется выражением

$$M_T = \sigma_T W_T = \sigma_T \cdot \frac{F}{2} \cdot (c_1 + c_2), \quad (1.1.1)$$

где W_T – предельный момент сопротивления; F – площадь поперечного сечения; c_1 и c_2 – отстояние центров тяжести каждой из половин профиля от оси, делящую площадь поперечного сечения пополам.

Когда каждая связь сечения обладает своим пределом текучести, то вместо формулы (1.1.1) следует использовать зависимость

$$M_T = \sigma_{Te} \cdot W_T. \quad (1.1.2)$$

Если в сечении действует только перерезывающая сила, то принимается, что она воспринимается только стенкой связи (рис.3-б). Предельное значение перерезывающей силы достигается, когда все касательные напряжения в стенке становятся равными пределу текучести при сдвиге

$\tau_T = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}$. Такое предельное состояние называется сдвиговым пластическим шарниром, а предельное значение перерезывающей силы равно

$$N_T = \tau_T \cdot \omega. \quad (1.1.3)$$

Если в сечении действует только продольная сила, ее предельное значение достигается, когда нормальные напряжения одного знака по всему сечению равны пределу текучести (рис.3-в). Такое предельное состояние называется продольным пластическим шарниром.

Предельное значение продольной силы вычисляется как

$$T_T = \sigma_T \cdot F, \quad (1.1.5)$$

а для общего случая различных значений предела текучести связей балки

$$T_T = \sigma_{Te} \cdot F = \sigma_{Te} \cdot (S_1 + \omega + S_2). \quad (1.1.6)$$

1.2. Совместное действие изгибающего момента и продольной силы

При совместном действии в сечении балки изгибающего момента M и продольной силы T следует определить соотношение между обобщенными усилиями, при котором наступает предельное состояние. Эпюра распределения напряжений в этом случае изображена на рис. 4.

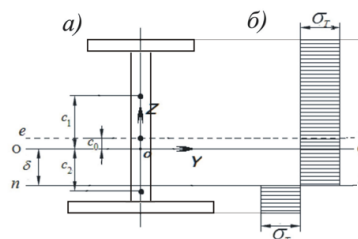


Рис. 4. Предельное состояния сечения при изгибающем моменте и продольной силе а) профиль балки; б) эпюра напряжений.

На рисунке 4 показаны следующие оси:

- пунктирная ось e-e, проходящая через центр тяжести профиля,
- ось o-o проведена через линию, делящую площадь поперечного сечения пополам (пластическая нейтральная ось при чистом изгибе),
- ось n-n – пластическая нейтральная ось при сложном изгибе.

Заметим, что в отличие от изгиба при отсутствии продольной силы, когда в предельном состоянии нейтральная ось проходит через линию, делящую площадь поперечного сечения пополам, изгиб балки при наличии продольной силы сопровождается смещением нейтральной оси от этого положения на некоторую величину δ [4].

Сумма проекций всех сил, действующих в сечении балки на горизонтальную ось дает

$$T = \left[\frac{F}{2} + \int_0^\delta b(z) dz \right] \sigma_T - \left[\frac{F}{2} - \int_0^\delta b(z) dz \right] \sigma_T. \quad (1.2.1)$$

Сумма моментов всех сил, действующих в сечении балки относительно оси o-o

$$M = \frac{F}{2} c_1 \sigma_T + \frac{F}{2} c_2 \sigma_T - 2 \int_0^\delta z \cdot b(z) dz \cdot \sigma_T - T c_0. \quad (1.2.2)$$

При составлении суммы моментов учитывалось, что линия действия силы T проходит через центр тяжести сечения, вследствие чего эта сила создает момент, равный $T c_0$.

c – отстояние центра тяжести профиля от оси o-o;
 $b(z)$ – ширина профиля на расстоянии z от оси o-o;

Преобразовывая уравнения (1.2.1) и (1.2.2) с использованием соотношений (1.1.2) и (1.1.5), будем иметь

$$\frac{T}{T_T} = \frac{2}{F} \int_0^\delta b(z) dz; \quad (1.2.3)$$

$$\frac{M}{M_T} = 1 - \frac{2}{W_T} \int_0^\delta (z + c_0) b(z) dz. \quad (1.2.4)$$

Если из уравнений (1.2.3) и (1.2.4) исключить величину δ , что всегда можно сделать в каждом конкретном случае, получим уравнение, устанавливающее соотношение между изгибающим моментом и продольной силой, совместное действие которых приводит сечение в предельное состояние

$$\frac{M}{M_T} = 1 - f\left(\frac{T}{T_T}\right). \quad (1.2.5)$$

Далее будем использовать следующие обозначения: $\bar{M} = \frac{M}{M_T}$ и $\bar{T} = \frac{T}{T_T}$.

В координатах \bar{M} и \bar{T} уравнение (1.2.5) определяет некоторую кривую, называемую кривой предельного состояния сечения балки или, сокращенно, предельной кривой [5, 6]. Эта кривая может быть продолжена и в область отрицательных значений \bar{M} и \bar{T} . В результате получится замкнутая кривая, ограничивающая определенную область. Точки, расположенные внутри этой кривой, отвечают «безопасному» сочетанию продольной силы и изгибающего момента, при котором сечение не может быть приведено в предельное состояние. Точки на этой кривой соответствуют критическому сочетанию, когда напряжения по всему поперечному сечению становятся равными пределу текучести.

Для симметричных относительно центра тяжести поперечных сечений наличие продольной силы приводит к уменьшению величины изгибающего момента, вызывающего в нем совместно с продольной силой предельное состояние. В случае несимметричного профиля влияние продольной силы может привести и к увеличению момента, вызывающего предельное состояние сечения.

Далее будем рассматривать более общий случай несимметричного двутаврового сечения, у которого свойства материала присоединенного пояска, стенки и свободного пояска различны.

При вычислении предельного изгибающего момента возможно три варианта в зависимости от расположения пластической нейтральной оси:

1) Если $S_2 \sigma_{Tp} > \omega \sigma_{Tw} + S_1 \sigma_{Tf}$, то пластическая нейтральная ось располагается в пределах присоединенного пояска;

2) Если $S_2 \sigma_{Tp} \leq \omega \sigma_{Tw} + S_1 \sigma_{Tf}$, то пластическая нейтральная ось располагается в пределах стенки ребра;

3) Если $S_1 \sigma_{Tf} > \omega \sigma_{Tw} + S_2 \sigma_{Tp}$, то пластическая нейтральная ось располагается в пределах свободного пояска (это возможно только при условии, что свободный поясок больше присо-

единенного пояска). Теперь рассмотрим каждый случай в отдельности.

2. Предельные кривые в зависимости от расположения нейтральной оси

2.1. Пластическая нейтральная ось располагается в пределах присоединенного пояска

Отметим правило знаков для δ : величина δ ниже пластической нейтральной оси положительна, т.к. положительна и осевая сила, и отрицательна выше пластической нейтральной оси.

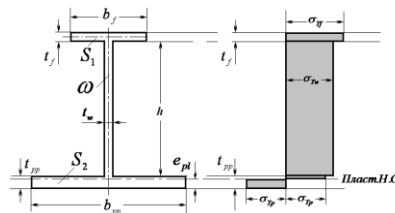


Рис. 5. Положение пласт. НО и эпюра нормальных напряжений

Поскольку расположение пластической нейтральной оси определяется так, что общая площадь поперечного сечения разделяется поровну на две, то из условия равновесия сил имеем:

$$e_{pl} = \frac{S_2 \sigma_{Tp} + \omega \sigma_{Tw} + S_1 \sigma_{Tf}}{2b_{pp} \cdot \sigma_{Tp}}. \quad (2.1.1)$$

Так же вычислим предельный момент сопротивления:

$$W_T = S_1 \left(\frac{t_f}{2} + h + t_{pp} - e_{pl} \right) + \omega \left(\frac{h}{2} + t_{pp} - e_{pl} \right) + \frac{b_{pp} (t_{pp} - e_{pl})^2}{2} + \frac{b_{pp} e_{pl}^2}{2}. \quad (2.1.2)$$

Для данного положения пластической нейтральной оси возможны четыре варианта расположения НО при совместном действии изгиба и растяжения:

- в присоединенном пояске ниже НО пласт.;
- в присоединенном пояске выше НО пласт.;
- в стенке;
- в свободном пояске.

Используя уравнения (2.2.3) - (2.2.4) для каждого варианта расположения НО, получены 4 функции $\bar{M} = \bar{M}(\bar{T})$ (2.1.3), (2.1.5), (2.1.7), (2.1.9), заданную на 4 интервалах (2.1.4), (2.1.6), (2.1.8), (2.1.10).

$$\bar{M} = 1 - \frac{2}{W_T} \left(\frac{F^2}{8b_{pp}} \bar{T}^2 + \frac{Fc_0}{2} \bar{T} \right); \quad (2.1.3)$$

$$0 \leq \bar{T} \leq \frac{2b_{pp} e_{pl}}{F}; \quad (2.1.4)$$

$$\bar{M} = 1 - \frac{2}{W_T} \left(\frac{F^2}{8b_{pp}} \bar{T}^2 + \frac{Fc_0}{2} \bar{T} \right); \quad (2.1.5)$$

$$-\frac{2b_{pp}(t_{pp} - e_{pl})}{F} \leq \bar{T} \leq 0; \quad (2.1.6)$$

$$\bar{M} = 1 - \frac{2}{W_T} \left[\frac{F^2}{8t_w} \bar{T}^2 + \frac{F(c_0 t_w - a(b_{pp} - t_w))}{2t_w} \bar{T} + a(b_{pp} - t_w) \left(\frac{a(b_{pp} - t_w)}{2t_w} - c_0 + \frac{a + 2c_0}{2} \right) \right]; \quad (2.1.7)$$

$$-\frac{2b_{pp}(t_{pp} - e_{pl})}{F} - \frac{2\omega}{F} \leq \bar{T} \leq -\frac{2b_{pp}(t_{pp} - e_{pl})}{F}; \quad (2.1.8)$$

$$\bar{M} = 1 - \frac{2}{W_T} \left[\frac{F^2}{8b_f} \bar{T}^2 + \frac{F}{2} \left(d - \frac{ab_{pp}}{b_f} + \frac{t_w(a-d)}{b_f} + c_0 \right) \bar{T} + \frac{(t_w(a-d) - ab_{pp} + b_f d)^2}{2b_f} + \frac{ab_{pp}(a+2c_0)}{2} + c_0(t_w(a-d) - ab_{pp} + db_f) - \frac{t_w(a-d)(a+d+2c_0)}{2} - \frac{db_f(a+2c_0)}{2} \right]; \quad (2.1.9)$$

$$-\left(\frac{2b_{pp}(t_{pp} - e_{pl})}{F} + \frac{2\omega}{F} + \frac{2S_1}{F} \right) \leq \bar{T} \leq -\left(\frac{2b_{pp}(t_{pp} - e_{pl})}{F} + \frac{2\omega}{F} \right). \quad (2.1.10)$$

3.2. Пластическая нейтральная ось располагается в пределах стенки

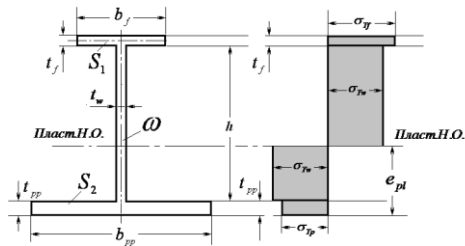


Рис. 6. Положение пласт. НО и эпюра нормальных напряжений

В данном случае положение пластической нейтральной оси из условия равновесия будет следующим:

$$e_{pl} = \frac{-S_2 \sigma_{Tp} + \omega \sigma_{Tw} + S_1 \sigma_{Tf}}{2t_w \cdot \sigma_{Tw}} + t_{pp} \quad (2.2.1)$$

Так же вычислим предельный момент сопротивления:

$$W_T = S_1 \left(\frac{t_f}{2} + h + t_{pp} - e_{pl} \right) + \frac{t_w (h + t_{pp} - e_{pl})^2}{2} + \frac{t_w (e_{pl} - t_{pp})^2}{2} + S_2 \left(\frac{t_{pp}}{2} + e_{pl} - t_{pp} \right) \quad (2.2.2)$$

Для данного положения пластической нейтральной оси возможны четыре варианта расположения НО при совместном действии изгиба и растяжения:

- в стенке ниже НО пласт.;
- в стенке выше НО пласт.;

- в присоединенном пояске;
- в свободном пояске.

Используя уравнения (1.2.3) - (1.2.4) для каждого варианта расположения НО, получены 4 функции $\bar{M} = \bar{M}(\bar{T})$ (2.2.3), (2.2.5), (2.2.7), (2.2.9), заданную на 4 интервалах (2.2.4), (2.2.6), (2.2.8), (2.2.10).

$$\bar{M} = 1 - \frac{2}{W_T} \left(\frac{F^2}{8t_w} \bar{T}^2 + \frac{Fc_0}{2} \bar{T} \right) \quad (2.2.3)$$

$$0 \leq \bar{T} \leq \frac{2t_w(e_{pl} - t_{pp})}{F} \quad (2.2.4)$$

$$\bar{M} = 1 - \frac{2}{W_T} \left(\frac{F^2}{8b_{pp}} \bar{T}^2 + \frac{F(b_{pp}(c_0 + a) - t_w a)}{2b_{pp}} \bar{T} - \frac{a^2 t_w (b_{pp} - t_w)}{2b_{pp}} \right) \quad (2.2.5)$$

$$\frac{2t_w(e_{pl} - t_{pp})}{F} \leq \bar{T} \leq \frac{2t_w(e_{pl} - t_{pp})}{F} + \frac{S_2}{F} \quad (2.2.6)$$

$$\bar{M} = 1 - \frac{2}{W_T} \left(\frac{F^2}{8t_w} \bar{T}^2 + \frac{Fc_0}{2} \bar{T} \right) \quad (2.2.7)$$

$$-\frac{2t_w(h + t_{pp} - e_{pl})}{F} \leq \bar{T} \leq 0 \quad (2.2.8)$$

$$\bar{M} = 1 - \frac{2}{W_T} \left(\frac{F^2}{8b_f} \bar{T}^2 + \frac{F(b_f c_0 + a_1(b_f - t_w))}{2b_f} \bar{T} - \frac{a_1^2 t_w (b_f - t_w)}{2b_f} \right) - \left(\frac{2t_w(h - e_{pl} + t_{pp})}{F} + \frac{2S_1}{F} \right) \leq \bar{T} \leq - \frac{2t_w(h - e_{pl} + t_{pp})}{F} \quad (2.2.10)$$

(3.2.9)

2.3. Пластическая нейтральная ось располагается в пределах свободного пояска

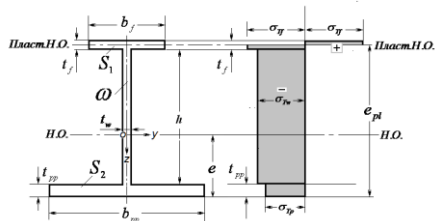


Рис. 7. Положение пласт. НО и эпюра нормальных напряжений

В данном случае положение пластической нейтральной оси из условия равновесия будет следующим:

$$e_{pl} = h + t_{pp} + t_f - \frac{S_2 \sigma_{Tp} + \omega \sigma_{Tw} + S_1 \sigma_{Tf}}{2b_f \cdot \sigma_{Tf}} \quad (2.3.1)$$

Так же вычислим предельный момент сопротивления:

$$W_T = \frac{b_f(h + t_{pp} + t_f - e_{pl})^2}{2} + \frac{b_f(e_{pl} - h - t_{pp})^2}{2} + \omega \left(e_{pl} - \frac{h}{2} - t_{pp} \right) + S_2 \left(\frac{t_{pp}}{2} + e_{pl} - t_{pp} \right) \quad (2.3.2)$$

Для данного положения пластической нейтральной оси возможны четыре варианта расположения НО при совместном действии изгиба и растяжения:

– в свободном пояске ниже НО пласт.;

$$\bar{M} = 1 - \frac{2}{W_T} \left[\frac{F^2}{8b_{pp}} \bar{T}^2 + \frac{F(c_0 b_{pp} + t_w(a-d) - ab_f + db_{pp})}{2b_{pp}} \bar{T} + \frac{(t_w(a-d) - ab_f + db_{pp})^2}{2b_{pp}} + c_0(t_w(a-d) - ab_f + db_{pp}) + \frac{ab_f(a+2c_0)}{2} - \frac{t_w(a-d)(a+d+2c_0)}{2} - \frac{db_{pp}(d+2c_0)}{2} \right] \quad (2.3.9)$$

$$- \left(\frac{2b_f(h + t_{pp} - e_{pl})}{F} - \frac{2\omega}{F} \right) \leq \bar{T} \leq - \left(\frac{2b_f(h + t_{pp} - e_{pl})}{F} - \frac{2(\omega - S_2)}{F} \right) \quad (2.3.10)$$

В итоге нами получены предельные кривые для различных вариантов сечения несимметричного двутавра. В зависимости от характерных размеров профиля, вид предельных кривых будет меняться. Однако, для примера вид кривых для 3-х полученных случаев представлен на рисунках 8-10.

– в свободном пояске выше НО пласт.;

– в стенке;

– в присоединенном пояске.

Используя уравнения (1.2.3) - (1.2.4) для каждого варианта расположения НО, получены 4 функции $\bar{M} = \bar{M}(\bar{T})$ (2.3.3), (2.3.5), (2.3.7), (2.3.9), заданную на 4 интервалах (2.3.4), (2.3.6), (2.3.8), (2.3.10).

$$\bar{M} = 1 - \frac{2}{W_T} \left(\frac{F^2}{8b_f} \bar{T}^2 + \frac{F c_0}{2} \bar{T} \right) \quad (2.3.3)$$

$$- (h + t_{pp} + t_f - e_{pl}) \frac{2b_f}{F} \leq \bar{T} \leq 0; \quad (2.3.4)$$

$$\bar{M} = 1 - \frac{2}{W_T} \left(\frac{F^2}{8b_f} \bar{T}^2 + \frac{F c_0}{2} \bar{T} \right) \quad (2.3.5)$$

$$0 \leq \bar{T} \leq (e_{pl} - h - t_{pp}) \frac{2b_f}{F}; \quad (2.3.6)$$

$$\bar{M} = 1 - \frac{2}{W_T} \left(\frac{F^2}{8t_w} \bar{T}^2 + \frac{F(c_0 t_w - a(b_f - t_w))}{2t_w} \bar{T} + \frac{a^2 b_f (b_f - t_w)}{2t_w} \right) \quad (2.3.7)$$

$$- \frac{2b_f(h + t_{pp} - e_{pl})}{F} \leq \bar{T} \leq - \left(\frac{2b_f(h + t_{pp} - e_{pl})}{F} - \frac{2\omega}{F} \right) \quad (2.3.8)$$

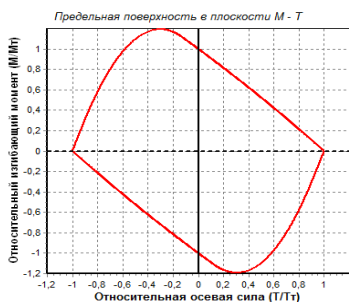


Рис. 8. Вид предельной кривой, когда пласт. НО располагается в присоединенном пояске

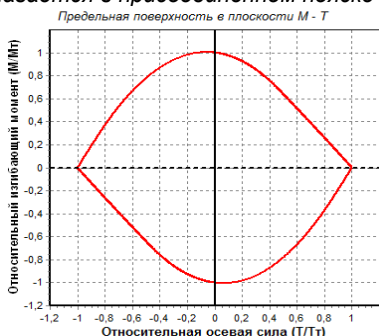


Рис. 9. Вид предельной кривой, когда пласт. НО располагается в стенке



Рис. 10. Вид предельной кривой, когда пласт. НО располагается в свободном пояске

3. Учет влияния сдвига на предельное состояние сечения при изгибе

Для учета влияния перерезывающей силы на предельное состояние сечения при изгибе принимается, что перерезывающая сила воспринимается только стенкой [7, 8]. Поэтому учет сдвига осуществляется редуцированием, путем уменьшения эффективной толщины стенки:

$$t_w(N) = t_w \sqrt{1 - N^2}, \quad (3.1)$$

где $N = \frac{N}{N_T} = \frac{\sqrt{3}N}{\sigma_{\omega T} \omega}$.

Далее, заменяя толщину стенки, t_w , выражением (4.1) во всех ранее полученных уравнениях, получаем функцию $\bar{M} = \bar{M}(T, N)$.

При этом отметим, что по мере роста перерезывающей силы величины M_T и T_T будут также меняться (т.к. зависят от толщины t_w), хотя они

должны оставаться постоянными. Поэтому необходимо ввести поправочные коэффициенты для \bar{M} и \bar{T} . Эти коэффициенты можно записать в виде отношения пластического момента сопротивления $W_T(N)$ к моменту сопротивления при $N = 0$, $W_T(0)$, и площадей для изгибающего момента и осевой силы соответственно:

$$k_1(N) = \frac{W_T(N)}{W_T(0)}; \quad k_2(N) = \frac{F(0)}{F(N)}. \quad (3.2)$$

Таким образом, общий вид уравнений для предельной поверхности будет иметь вид:

$$\bar{M}(T, N) = k_1 M(k_2 T, N). \quad (3.3)$$

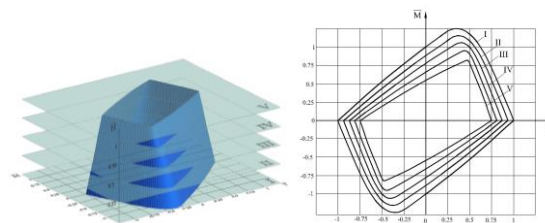


Рис. 11. Характерная предельная поверхность несимметричного двутаврового профиля и сечения этой поверхности плоскостями параллельными основанию.

Заключение

В данной статье рассмотрено предельное состояние сечения при сложном изгибе с учетом сдвига, в частности для двутаврового профиля. Полученные уравнения для предельных кривых и поверхностей могут быть использованы не только для несимметричного двутавра, но и для любого профиля состоящего из прямоугольников и симметричного относительно вертикальной оси. Например, симметричного двутаврового профиля, идеального и прямоугольного профилей.

Как видно из полученных предельных кривых, учет дополнительных внутренних силовых факторов может как увеличивать изгибающий момент, при котором сечение приходит в предельное состояние, но и может его снижать. Полученные предельные кривые и поверхности могут быть применены для получения параметров изгиба балок с учетом продольных усилий. Для этого, например, можно использовать приближенную методику, основанную на гипотезе "мгновенного раскрытия пластических шарниров".

Согласно данной методике выполняется следующий порядок действий [9]:

процесс упругопластического изгиба балки разбивается на стадии, смена которых происходит либо после образования пластических шарниров, либо после достижения продольной силой предельного значения;

на каждой стадии прогиб балки аппроксимируется определенными функциями;

для каждой стадии составляются уравнение равновесия и уравнение совместности деформации, совместное решение которых дает неиз-

вестные параметры изгиба для рассматриваемой стадии.

После образования пластических шарниров по длине балки и превращением ее в кинематический механизм с учетом действия осевых сил, для составления уравнений равновесия необходимо располагать величиной предельного изги-

бающего момента сечения, которая будет зависеть от величины осевой силы.

Однако, детальный обзор аналитических моделей для исследования упруго-пластического деформирования балок является темой отдельной статьи и в данной работе рассмотрен не был.

Литература

1. *Беленький Л.М.* Расчет судовых конструкций в пластической стадии. Л., Судостроение, 1983, 448 с.
2. *Бененсон А.М.* Предельное состояние несимметричного двутавра при поперечном изгибе.- Труды НКИ, Николаев, 1984, с.17-25.
3. *Качанов Л.М.* Основы теории пластичности. М., Наука, 1969г, 420 с.
4. *Дикович И.Л.* Статика упруго-пластических балок судовых конструкций. Л., Судостроение, 1967, 264 с.
5. *Ueda, Y., Rashed, S.M.H.* The idealized structural unit method and its application to deep girder structures. Computers & Structures, 1984, №18(2). P. 277-293.
6. *Мразик А., Шкалоуд М., Тохачек М.* Расчет и проектирование стальных конструкций с учетом пластических деформаций. - М.: Стройиздат, 1986. - 456 с.
7. Предельные нагрузки и упругопластическое деформирование судовых балочных конструкций: Монография / ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, СПб, 2012, 128 с.
8. *Timoshenko S., Gere J. M.,* Theory of Elastic Stability, 2nd Edn. McGraw-Hill, New York .1961.
9. *Бураковский Е. П.* Совершенствование нормирования параметров эксплуатационных дефектов корпусов судов. Издательство КГТУ, Калининград, 2005, 339 с.
10. *Vhanmane, S., and Bhattacharya, B.,* Ultimate Strength Analysis of Ship Hull Girder Under Random Material and Geometric Properties. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, August 2011, Vol. 133.

References

1. *Belen'kij L.M.* Raschet sudovyh konstrukcij v plasticheskoj stadii. L., Sudostroenie, 1983, 448 s.
2. *Benenson A.M.* Predel'noe sostojanie nesimmetrichnogo dvutavra pri poperechnom izgibe.- Trudy NKI, Nikolaev, 1984, s.17-25.
3. *Kachanov L.M.* Osnovy teorii plastichnosti. M., Nauka, 1969g, 420 s.
4. *Dikovich I.L.* Statika uprugoplasticheskih balok sudovyh konstrukcij. L., Sudostroenie, 1967, 264 s.
5. *Ueda, Y., Rashed, S.M.H.* The idealized structural unit method and its application to deep girder structures. Computers & Structures, 1984, №18(2). P. 277-293.
6. *Mrazik A., Shkaloud M., Tohachek M.* Raschet i proektirovanie stal'nyh konstrukcij s uchetom plasticheskikh deformacij. - M.: Strojizdat, 1986. - 456 s.
7. Predel'nye nagruzki i uprugoplasticheskoe deformirovanie sudovyh balochnyh konstrukcij: Monografiya / CNII im. akad. A.N. Krylova, SPb, 2012, 128 s.
8. *Timoshenko S., Gere J. M.,* Theory of Elastic Stability, 2nd Edn. McGraw-Hill, New York .1961.
9. *Burakovskij E. P.* Sovershenstvovanie normirovanija parametrov jekspluatacionnyh defektov korpusov sudov. Izdatel'stvo KGTU, Kaliningrad, 2005, 339 s.
10. *Vhanmane, S., and Bhattacharya, B.,* Ultimate Strength Analysis of Ship Hull Girder Under Random Material and Geometric Properties. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, August 2011, Vol. 133.

Проектирование и конструкция корабля

УДК 629.12.001.2

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО РАМНОГО БОРТОВОГО НАБОРА КОРПУСА НАДВОДНОГО КОРАБЛЯ

Дехтярь Ирина Владимировна

аспирантка кафедры конструкции и технической эксплуатации судов
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: irina.dekhtyar@yandex.ru

Тряскин Владимир Николаевич

д.т.н., профессор,
профессор кафедры конструкции и технической эксплуатации судов
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru

Аннотация

В настоящей статье рассмотрена задача параметрического проектирования поперечного рамного бортового набора конструкций корпуса надводного корабля - рамных шпангоутов, расположенных между палубами и платформами в районе за пределами машинно-котельного отделения. Проблема сводится к решению задачи математического программирования. Ограничения в виде неравенств формируются на основе нормативных требований Правил классификации и постройки надводных кораблей Французского Бюро Веритас и Правил Российского морского регистра судоходства в части ледовых усилений. Перечислены расчётные нагрузки, которые должны быть рассмотрены в процессе проектирования. Представленную в статье задачу предложено рассматривать отдельно для каждого типа нагрузки. При проектировании рамного бортового набора используется модель неразрезной балки, при этом в связи с изменением расчетной нагрузки по высоте борта изменяются и размеры рам. Представлен упрощенный вариант постановки задачи проектирования рамных шпангоутов конструкций надводного корабля, с целью проверки методики и алгоритма. Указано, что необходимость выбора профиля поперечного сечения балки приводит к дискретности области возможных решений задачи.

Ключевые слова: параметрическое проектирование, автоматизированное проектирование, неразрезная балка, математическое программирование, рамная балка, однопролетная балка, функция цели.

DESIGN OF NAVAL SHIPS SIDE TRANSVERSE WEB FRAMES

Dekhtyar Irina Vladimirovna

postgraduate student of DEPARTMENT OF SHIP CONSTRUCTION AND TECHNICAL OPERATION,
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT- PETERSBURG
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: irina.dekhtyar@yandex.ru

Tryaskin Vladimir Nikolaevich

Dr. Sci. Tech., the professor
the professor of DEPARTMENT OF SHIP CONSTRUCTION AND TECHNICAL OPERATION,
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT- PETERSBURG
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru

Abstract

The problem of naval ships side transverse web frames parametrical design is considered in this article. Such structures are web frames between decks and platforms outside engine and boiler room. The problem is reduced to the solution of mathematical programming task. Restrictions in the form of inequalities are based on the requirements of Bureau Veritas Rules and Russian Maritime Register of

Shipping Rules as applied to ice strengthening. Design loads, which should be taken into account are listed in this article. However, it is proposed that separated solutions should be got for each design load. Model of continuous beam is used in the design of naval ships side transverse web frames. Design loads depend on the application of load calculation point and this fact has an effect on the web frame dimensions. Simplified task is presented for the purpose of checking the methodology and algorithm. The problem of frame section scantlings selection leads to discreteness of a task solution.

Key words: parametrical designing, computer-aided design, continuous beam, mathematical programming, web frame, single-span beam, goal function.

1. Конструкция борта надводного корабля

Бортовые конструкции надводных кораблей класса "Фрегат" и выше во всех районах по длине имеют продольную систему набора. Продольные бортовые балки располагаются на расстоянии 300-500 мм приблизительно по нормали к наружной обшивке. Рамные шпангоуты, которые опираются на палубы или платформы, устанавливаются в плоскости флоров днищевых перекрытий (через 1.5-2.0 м). Рамный шпангоут выполняется из сварного таврового профиля, высота стенки которого увеличивается к нижнему опорному сечению. При пересечении с промежуточными палубами рекомендуется обеспечивать непрерывность стенки и пояса.

В машинно-котельном отделении (МКО), как правило, одна из промежуточных палуб или платформ отсутствует (пропадает). В плоскости этой палубы с каждого борта устанавливаются стрингеры. Назначение бортовых стрингеров - создание промежуточных упругих опор для рамных шпангоутов. Чтобы бортовые стрингеры эффективно выполняли эту функцию, вместо некоторых рамных шпангоутов (на расстоянии 3,0-4,5 м) устанавливаются усиленные рамы.

Стенка рамного шпангоута при пересечении с бортовым стрингером разрезается.

В нижнем опорном сечении рамный шпангоут соединяется с флором при помощи приставной или встроенной кницы. Свободный пояс рамного шпангоута соединяется с крайним междудонным листом или с настилом второго дна через переходную вставку.

Соединение рамных шпангоутов с рамными бимсами палуб и платформ в практике конструкторских бюро принято осуществлять при помощи встроенных (сварных) книц или книц, являющихся продолжением стенки рамного бимса. Соединение с приставными кницами допускаются при значительной разнице высот одной из соединяемых балок, а также при соединении рамных шпангоутов с рамными бимсами промежуточных палуб.

2. Требования к рамным балкам бортового набора¹

2.1. Расчетные нагрузки

При проектировании бортовых конструкции корпуса корабля должна учитываться следующая совокупность расчетных нагрузок: статические нагрузки (давления) на тихой воде, p_s ; дополнительные (квазистатические) волновые давления), p_w ; давления статические, p_{SF} и волновые, p_{WF} при аварийной посадке корабля, обусловленной аварийным затоплением отсека (группы отсеков); гидродинамические давление при бортовом слеминге, p_{SL} ; ледовые нагрузки, которые характеризуются контактным давлением, p_{ice} , высотой, b_{ice} и длиной, l_{ice} зоны контакта корпуса корабля со льдом.

Волновые дополнительные нагрузки для неповрежденного состояния корабля определяются для нескольких возможных случаев движения корабля: на встречном волнении; на попутном волнении; косым курсом по направлению к распространению волнения с учетом крена и дифферента.

Проектирование поперечного набора целесообразно выполнять отдельно для каждого типа нагрузки. Расчетными будут те нагрузки, которые приводят к наибольшим размерам балок бортового набора.

2.2. Расчетные модели

При проектировании рамного бортового набора, расположенного за пределами МКО, используется модель неразрезной балки. На разных участках по высоте борта (в разных твиндеках) размеры рам различаются в связи с изменением расчетной нагрузки. В общем случае (учитывая особенности формы корпуса корабля) на каждом участке борта рамные балки представляют собой криволинейный стержень, размеры поперечного сечения которого изменяются по пролету. Эта конструктивная особенность может быть учтена при компоновке

¹ Требования к рамным балкам заимствованы из Правил Французского Бюро Веритас (BV) [1] и Российского морского регистра судоходства (РМРС) [2] в части ледовых усилений.

расчетной модели. Соотношение высоты балки и пролета таково, что при раскрытии статической неопределенности, например, в рамках метода трех моментов, необходимо учитывать влияние сдвига.

Расчетная модель, которая должна рассматриваться при проектировании рамного бортового набора в МКО значительно более сложная. Она представляет собой перекрытие, включающее вертикальные непрямые криволинейные стержни - рамные шпангоуты и усиленные рамы, и горизонтальный стержень переменного сечения - бортовой стрингер.

В настоящей статье рассматривается задача о проектировании рамного набора борта, расположенного за пределами МКО, т.е. задача проектирования рамных шпангоутов с использованием модели неразрезной или однопролетной балки.

2.3. Нормативы прочности и расчетные зависимости

Требования к прочности рамного шпангоута формулируются применительно к нетто размерам. Добавки на износ составляют 0,0 – 0,5 мм - согласно требованиям Правил BV [1] и 1,2 – 2,52 мм - согласно требованиям Правил РМРС [2] для рамных шпангоутов, расположенных в районе ледовых усилений.

Требования к размерам рамных шпангоутов при расчете на эксплуатационные нагрузки в Правилах BV получены в предположении работы элементов шпангоутов в упругой стадии. Согласно требованиям BV нормальные, σ и касательные, τ напряжения не должны

превосходить величин, определяющихся следующими условиями:

$$\frac{R_y}{Y_R Y_m} \geq \sigma; \quad 0,5 \frac{R_y}{Y_R Y_m} \geq \tau \quad (1)$$

где R_y - предел текучести стали, $Y_R = 1,15$ и $Y_m = 1,02$ - коэффициенты запаса, учитывающие неопределенность определения расчетных напряжений и предела текучести материала. С учетом этих нормативов требуемый момент сопротивления нетто, w , в см^3 и нетто площадь сечения стенки, A_{sh} , в см^2 , определяются следующими формулами:

$$w = Y_R Y_m \beta_b \frac{Y_{S2} \lambda_{bs} P_S + Y_{W2} \lambda_{bW} P_W}{m R_y} s l^2 10^3 \quad (2)$$

$$A_{sh} = 10 Y_R Y_m \beta_s \frac{Y_{S2} \lambda_{sS} P_S + Y_{W2} \lambda_{sW} P_W}{R_y} s l \quad (3)$$

где Y_{S2} , Y_{W2} – частные коэффициенты запаса, учитывающие неопределенности (погрешности) определения нагрузок на тихой воде и на волнении, характеристик поперечного сечения балок набора; β_b , β_s – коэффициенты, характеризующие условия закрепления балок в опорных сечениях; λ_{bs} , λ_{bW} , λ_{sS} , λ_{sW} - коэффициенты, учитывающие характер изменения нагрузки по пролету рамного шпангоута; l - расчетный пролет, м; s - расстояние между рамными шпангоутами, м.

Размеры рамных шпангоутов при расчете на аварийные нагрузки определяются условиями предельной прочности:

$$w = Y_R Y_m \beta_b \frac{Y_{S2} \lambda_{bS} P_{SF} + Y_{W2} \lambda_{bW} P_{WF}}{16 c_p \cdot R_y} s l^2 10^3 \quad (4)$$

$$A_{sh} = 10 Y_R Y_m \beta_s \frac{Y_{S2} \lambda_{sS} P_{SF} + Y_{W2} \lambda_{sW} P_{WF}}{R_y} s l \quad (5)$$

c_p - соотношение между пластическим и упругим моментом сопротивления (при отсутствии точных данных допускается принимать $c_p = 1,16$).

Требования к размерам рамных шпангоутов при воздействии нагрузки от слеминга в соответствии с требованиями Правил Бюро Веритас устанавливаются проверочным расчетом с использованием МКЭ-модели [1] (в данной статье эти требования не рассматриваются).

При расчетах на ледовые нагрузки Правилами РМРС формулируются требования к предельному моменту сопротивления поперечного сечения рамного шпангоута, W_p и площади сечения, воспринимающей предельную перерезывающую силу, A_p из условия предельной прочности. Упрощенно эти требования можно представить в следующем виде:

$$W_p \geq k_p W_{p0}(p_{lce}; b_{lce}; l_{lce}; s_0; s; R_y; l) \quad (6)$$

$$A_p \geq A_{p0}(p_{lce}; b_{lce}; l_{lce}; s_0; s; R_y; l) \quad (7)$$

где $k_p W_{p0}(p_{lce}; b_{lce}; l_{lce}; s_0; s; R_y; l)$ - требуемый пластический момент сопротивления нетто и $A_{p0}(p_{lce}; b_{lce}; l_{lce}; s_0; s; R_y; l)$ - требуемая площадь сечения нетто профиля, воспринимающая предельную перерезывающую силу, ($p_{lce}; b_{lce}; l_{lce}$) и параметров конструкции (расстояния между продольными балками - s_0 , расстояния между рамными шпангоутами - s , предела текучести стали - R_y), определяемые согласно п. 3.10.4.7.1 и 3.10.4.7.2 Правил РМРС [2].

2.4. Ограничения на размеры элементов рамных балок

При анализе Правил BV и РМРС [1, 2] получены следующие рекомендации для рамных балок бортового набора:

2.4.1. Нетто момент сопротивления рамного шпангоута в рассматриваемом твиндеке не может быть меньше, чем в выше расположенном, смежном с ним.

2.4.2. Размеры элементов поперечного набора зависят от размеров балок продольного набора через соотношение:

$$h_w \geq kh_0 \quad (8)$$

где h_w - высота балки поперечного рамного набора; h_0 - высота балки продольного набора; $k = 1,7$ - в общем случае; $k = 2,0$ - для ледовых усилений.

2.4.3. Высота стенки шпангоута от днища к палубе, может постепенно уменьшаться; максимально допустимое изменение высоты составляет 8 см на 1 метр;

2.4.4. Каждый шпангоут в нижнем опорном сечении должен оканчиваться кницей.

3. Постановка задачи параметрического проектирования рамных шпангоутов в районах за пределами МКО

Параметрическое проектирование конструкций – процесс определения размеров конструктивных элементов, удовлетворяющих требованиям нормативных документов (Правила классификации и постройки морских судов, норм прочности) [3].

Математическая модель задачи проектирования:

$$GF(\mathbf{X}) \rightarrow \text{Extr} \quad (9)$$

при ограничениях:

$$h_j(\mathbf{X}) = 0, j = 1, \dots, m \quad (10)$$

$$g_j(\mathbf{X}) \geq 0, j = m+1, \dots, p \quad (11)$$

и граничных условиях:

$$(x_i)_{\min} \leq x_i \leq (x_i)_{\max}, i = 1, \dots, k \quad (12)$$

где $\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_k]^T$ - вектор-столбец независимых переменных – варьируемых конструктивных параметров; $GF(\mathbf{X})$ - функция цели; $h_j(\mathbf{X})$ - ограни-

чение в виде равенств; $g_j(\mathbf{X})$ - ограничения-неравенства [3].

В соответствии с основными положениями методологии автоматизированного проектирования конструкций корпуса судна/корабля, предложенной в работе [3], проектирование рамного набора реализуется после проектирования листовых элементов и балок основного набора. Таким образом, к началу рассматриваемого этапа, мы располагаем информацией о толщине бортовой обшивки и размерах бортовых продольных балок. Задача проектирования балок основного набора рассмотрена в работе [4].

Поэтому исходные данные задачи следующие:

n - количество участков, на которые разбивается рамный шпангоут палубами и платформами;

l_i - пролет шпангоута на i -ом участке, м, $i = 1, \dots, n$;

t_i - толщина наружной обшивки на i -ом участке, мм, $i = 1, \dots, n$;

$h_{0,i}$ - высота продольной бортовой балки на i -ом участке, мм, $i = 1, \dots, n$;

$P_s, P_w, P_{SF}, P_{WF}, P_{Ice}, b_{Ice}, l_{Ice}$ - параметры расчетных нагрузок на каждом участке, кПа;

R_y - предел текучести материала рамных шпангоутов, МПа;

s - расстояние между рамными шпангоутами, м.

В качестве варьируемых параметров примем:

$x_i = A_{0,i}$ - среднее значение площади сечения изолированного профиля рамного шпангоута на участке i , см². Тогда вектор варьируемых переменных $\mathbf{X} = \{x_i\}^T, i = 1, \dots, n$.

Целевая функция:

$$GF(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot l_i, \text{ см}^2 \cdot \text{м} - \text{характеристика массы по-$$

перечного рамного набора, которая минимизируется при следующих возможных ограничениях-неравенствах:

$$g_{1,i}(\mathbf{X}) = \left(\frac{x_i}{C_w}\right)^{1,5} - 10^3 \cdot Y_R \cdot Y_m \cdot \beta_b \cdot \frac{Y_{S2} \lambda_{bs} \cdot P_{s,i} + Y_{W2} \lambda_{bw} \cdot P_{w,i}}{m \cdot R_y} \cdot s \cdot l_i^2 \geq 0, i = 1, \dots, n. \quad (13)$$

$$g_{2,i}(\mathbf{X}) = \alpha_{sh} \cdot x_i - 10 \cdot Y_R Y_m \beta_s \cdot \frac{Y_{S2} \lambda_{ss} \cdot P_{s,i} + Y_{W2} \lambda_{sw} \cdot P_{w,i}}{R_y} \cdot s \cdot l_i \geq 0, i = 1, \dots, n. \quad (14)$$

$$x_{i(\min)} \leq x_i \leq x_{i(\max)}, i = 1, \dots, n. \quad (15)$$

Значения коэффициентов утилизации площади по моменту сопротивления, C_w и параметра α_{sh} , определяющих функциональную связь между площадью сечения изолированного профиля x_i , нетто моментом сопротивления сечения с присоединенным пояском $W_i = \left(\frac{x_i}{C_w}\right)^{1,5}$ и пло-

щадью сечения стенки балки (площадью среза)

$A_{sh,i} = \alpha_{sh} x_i$ соответственно, могут быть установлены (найжены) по данным сортамента на сварные составные профили, которые широко используются при проектировании рамного набора надводных кораблей.

Коэффициент расчетного изгибающего момента в первом приближении может быть принят

по рекомендациям Правил Бюро Веритас для надводных кораблей [1] $m = 12$.

Ограничения снизу на значения варьируемых параметров следует принять с учетом соотношения высот стенок балок основного набора и рамных балок: $h_w \geq 1,7h_0$, используя данные сортамента на сварные составные профили

$$A_0 = f(h_w).$$

Ограничения сверху можно не учитывать.

Аналогичным образом формируются ограничения-неравенства при проектировании рамных

$$g_{1,i}(\mathbf{X}) = c_p \left(\frac{x_i}{C_w} \right)^{1,5} - k_p \cdot W_0(p_{lce}; b_{lce}; l_{lce}; a_i; a_1; R_{eH}; l_i) \geq 0 \quad (16)$$

$$g_{2,i}(\mathbf{X}) = \alpha_{sh} x_i - A_0(p_{lce}; b_{lce}; l_{lce}; a_i; a_1; R_{eH}; l_i) \geq 0 \quad (17)$$

где индекс i касается только участка, где возможны воздействия льда (ледовый пояс). В ограничении (16): c_p - коэффициент, определяющий соотношение между пластическим и упругим моментом сопротивления (на начальном этапе проектирования может быть принят равным 1,16).

Учитывая рекомендации, представленные в п. 2.4.1, задача должна быть дополнена ограничениями:

$$g(\mathbf{X}) = x_{i+1} - x_i \geq 0, i = 1, \dots, n. \quad (18)$$

Поскольку высота стенки рамного шпангоута в соответствии с условием представленные в п.2.4.2 зависит от принятой высоты продольной бортовой балки, то в состав ограничений необходимо включить ограничение:

$$g(\mathbf{X}) = h_w(x_i) - h_{w,min} \geq 0, i = 1, \dots, n \quad (19)$$

При этом зависимость высоты стенки рамы от площади сечения изолированного профиля, $h_w(x_i)$ можно установить по данным сортамента на сварной тавровый профиль.

Рекомендации п. 2.4.3 могут быть формализованы в виде следующего ограничения - неравенства:

$$g(\mathbf{X}) = \frac{1000I}{8} - [h_w(x_{i+1}) - h_w(x_i)] \geq 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (20)$$

Задача, представленная в виде совокупности зависимостей (8)-(20) может быть успешно решена с использованием инструмента Microsoft Excel - "Поиск решения". В результате решения найдутся значения площади сечения составного таврового профиля нетто на разных участках по высоте борта.

шпангоутов на аварийную нагрузку с учетом требования (8)-(10).

Требования к размерам рамных шпангоутов при воздействии нагрузки от слеминга в соответствии с требованиями Правил Бюро Веритас устанавливаются проверочным расчетом с использованием МКЭ-модели [5].

На ледовые нагрузки проектируется рамный шпангоут только на участке, расположенном в районе ледовых усилений. Основываясь на требованиях Правил РМРС в части ледовых усилений (6), (7), можно получить следующие ограничения:

Следующим этапом будет подбор профиля с ориентацией на полученное решение и данные сортамента на составные сварные тавры. При этом предварительно необходимо увеличить требуемые значения площадей сечения для учета добавки на коррозионный износ его элементов. Для этого нужно умножить найденные значения на коэффициент $\omega_c > 1,0$. Оценки значений этого коэффициента можно получить по результатам обработки сортаментных данных для сварных тавровых профилей или по формулам, приведенным в Правилах РМРС.

Поскольку при выборе профиля происходит некоторое изменение значений варьируемых переменных, то необходимо выполнить проверочный расчет, чтобы убедиться, что такие значения варьируемых параметров не привели к нарушению ограничений задачи.

Заключение

В настоящей статье представлен упрощенный вариант постановки задачи проектирования рамных шпангоутов конструкций надводного корабля. Цель - проверка работоспособности методики и алгоритма. В дальнейшем предполагается значительно усложнение постановки задачи: применение метода трех моментов с учетом влияния сдвига и переменности характеристик стержней по пролету при раскрытии статической неопределенности.

Литература

1. Rules for the classification of naval ships. - Bureau Veritas.: France, 2011. - 224 с.
2. Правила классификации и постройки морских судов: СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015. Т. 1. 506 с.
3. Тряскин В.Н. Автоматизированное параметрическое проектирование конструкций корпуса судна: учебное пособие/ В.Н. Тряскин. – СПб.: СПбГМТУ, 2010. - 152 с.

4. Тряскин В.Н. Параметрическое проектирование балочных элементов конструкций корпуса судна // ЦНИИ им. А.Н. Крылова, Труды конференции по строительной механике корабля, посвященной памяти академика Ю.А. Шиманского, 2003. - 107 с.
5. Тряскин В.Н. Методология автоматизированного проектирования конструкций корпуса судна: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.08.03. – Санкт-Петербург, 2007. - 339 с.

References

1. Rules for the classification of naval ships. Bureau Veritas, France, 2011, 224 p.
2. Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov: SPb, Rossijskij morskoy registr sudohod-stva, 2015, Т. 1, 506 p.
3. Trjaskin V.N. Avtomatizirovannoe parametricheskoe proektirovanie konstrukcij korpusa sudna: uchebnoe posobie, SPb, St.Peterburg State Marite Technical University, 2010, 152 p.
4. Trjaskin V.N. Parametricheskoe proektirovanie balochnyh jelementov konstrukcij korpusa sudna. Trudy konferencii po stroitel'noj mehanike korablja, posvjashhen-noj pamjati akademika Ju.A. Shimanskogo, SPb, CNII im. A.N. Krylova, 2003, 107 p.
5. Trjaskin V.N. Metodologija avtomatizirovannogo proektirovanija konstrukcij korpusa sudna: dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehniceskikh nauk: 05.08.03. Sankt-Peterburg, 2007, 339 p.

Физические поля корабля, океана, атмосферы и их взаимодействие

УДК 534.321.9

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ, СОДЕРЖАЩЕЙ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Пугачев Сергей Иванович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
тел. (812) 757-10-55; e-mail: spugachev@bk.ru

Рытов Евгений Юрьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры физики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
тел. (812) 757-10-55; e-mail: physics_spbmtu@mail.ru

Малышкина Ольга Витальевна

доктор физико-математических наук, профессор, заведующая кафедрой
«Технической физики и инновационных технологий»
Тверской государственный университет
170002, Тверь, Садовый пер., 35
Тел. (4822) 361-493 (доб.128); e-mail: Olga.Malyshkina@mail.ru

Топчиёв Анатолий Андреевич

студент кафедры «Технической физики и инновационных технологий»
Тверской государственный университет
170002, Тверь, Садовый пер., 35
Тел. (4822) 361-493 (доб.128); e-mail: Olga.Malyshkina@mail.ru

Краснов Алексей Владимирович

зам. начальника отдела
ОАО «Концерн «МПО-Гидроприбор»
194044, Санкт-Петербург, Большой Сампсониевский пр., 24
Тел. (812) 292-28-18; e-mail: clepto@inbox.ru

Мараховский Михаил Алексеевич

начальник сектора НКТБ «Пьезоприбор»
Южный федеральный университет
344090, Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10
тел.+7.(904) 581-54-31; e-mail: marmisha@mail.ru

Нагаенко Александр Владимирович

Начальник сектора НКТБ «Пьезоприбор»
Южный федеральный университет
344090, Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10
тел.+7.(904) 506-10-82; e-mail: nagalexander@mail.com

Аннотация

Приведены результаты экспериментального исследования процесса ультразвукового формообразования пьезокерамических элементов из материалов системы титаната бария и цирконата-титаната свинца. Для изготовления материала на основе титаната бария использованы ультрадисперсные частицы, полученные посредством механохимической активации прокурсоров. Материал системы цирконата-титаната свинца содержал ультрадисперсные частицы углекислого стронция, полученные методом «химической сборки». Представлена колебательная система установки для ультразвукового формообразования пьезокерамики и приведены значения технологических параметров процесса, обеспечивающие максимальную плотность заготовок. Приведены результаты физического исследования фазового состава пьезокерамических материалов. Определены электрофизические и механические характеристики пьезокерамических элементов и показано, что сочетание нового процесса формообразования пьезокерамики и

наличия в ее составе ультрадисперсных частиц улучшают основные эксплуатационные характеристики пьезокерамических элементов.

Ключевые слова: пьезокерамика, ультразвук, формообразование, ультрадисперсные частицы, фазовый состав, пьезокерамический элемент, эксплуатационные характеристики

ULTRASOUND MOLDING PIEZOELECTRIC CERAMICS CONTAINING THE ULTRAFINE PARTICLES

Pugachev Sergey Ivanovich

prof., Dr. Sci.Tech., professor of a chair of physics
State Marine Technical University of St. Petersburg, Lotsmanskaya Str. 3, St. Petersburg,
190008 Russia, tel. (812) 757-10-55; e-mail: spugachev@bk.ru

Rytov Evgeny Iurivich

Cand.Sci.Tech. the senior lecturer
State Marine Technical University of St. Petersburg, Lotsmanskaya Str. 3, St. Petersburg,
190008 Russia, tel. (812) 757-10-55; e-mail: physics_spbmtu@mail.ru

Malyshkina Olga Vitalievna

prof., Dr. Sci. Phys.-Math., head of a chair "Technical Physics and innovative technologies"
Tver State University, Sadovaij per. 35, Tver, 170002, Russia,
Tel. (4822) 361-493 (128); e-mail: Olga.Malyshkina@mail.ru

Topchiev Anatolij Andreevich

Ph. student of a chair "Technical Physics and innovative technologies"
Tver State University, Sadovaij per. 35, Tver, 170002, Russia,
Tel. (4822) 361-493 (128); e-mail: Olga.Malyshkina@mail.ru

Krasnov Aleksej Vladimirovich

The Head of department JSC «Concern «MUV – Gidropribor»
24, Bolshoj Sampsonievskij Str., 194044, Russia
Тел. (812) 292-28-18; e-mail: clepto@rambler.ru

Marakhovskiy Mikhail Alekseevich

the Head of department SDTD «Piezopriboor»
Southern Federal University
10, Milchakova Str., Rostov-on-Don, 344090 Russia
Тел. +7 (904) 501-54-31; e-mail: marmisha@mail.ru

Nagaenko Alexandr Vladimirovich

The Head of department SDPD «Piezopribor»
Southern Federal University
10, Milchakova Str., Rostov-on-Don, 344090, Russia
Тел. +7 (904) 506-10-82; e-mail nagalexander@mail.com

Abstract

We experimentally investigated the process of forming an ultrasonic piezoelectric elements from materials of barium titanate and lead zirconate titanate. To produce the material on the barium titanate the ultrafine particles are used. They were obtained by means of mechanochemical activation of precursor. The material of lead zirconate titanate contains the ultrafine particles of strontium carbonate obtained by "chemical assembly." The paper describes the plant of the vibration system for ultrasonic forming of piezoelectric ceramics and given the values of technological parameters of process to ensure the maximum density of blanks. The results of the research of the structure and chemical composition of the piezoceramic materials are presented. Are determined the electrical and mechanical characteristics of the piezoceramic elements. It is shown that the combination of a new forming process of the piezoceramic and the presence in its structure of the ultrafine particles to improve the basic performance parameters of the piezoceramic elements.

Key words: piezoelectric ceramic, ultrasound, molding, ultrafine particle, phase composition, piezoceramic transducer, performance parameters.

Введение

Эффективность применения низкочастотных ультразвуковых колебаний (УЗК) высокой интен-

сивности в процессе формообразования изделий из неметаллических порошков показана во многих работах [1-3]. К преимуществам новой технологии по сравнению с промышленным холодным

одноосным прессованием относят улучшение характеристик изделий при одновременном снижении усилия статического прессования. В то же время показано [4-5], что улучшение эксплуатационных характеристик изделий может достигаться введением в формуемый порошок ультрадисперсных частиц. Поэтому целесообразно сочетать преимущества ультразвукового формообразования (УЗФО) изделий с возможностями, открывающимися при использовании в этом процессе ультрадисперсных порошков. В настоящей работе такой подход реализован применительно к процессу формообразования пьезокерамических элементов (ПКЭ), составляющих основу современных излучателей и приемников звука (ультразвука). При этом для изготовления ПКЭ использовали промышленные пьезокерамические материалы:

- 1) титанат бария-кальция, ТБК-3:
 $(\text{Ba}_{0,95} \text{Ca}_{0,05})\text{TiO}_3 + 0,75\% \text{CoCO}_3$
- и 2) цирконат-титанат бария-свинца, ЦТБС-3:
 $\text{Pb}_{0,75} \text{Ba}_{0,25} (\text{Zr}_{0,53} \text{Ti}_{0,47})\text{O}_3 + 0,08\% \text{SrCO}_3$.

1. Изготовление опытных образцов

Режимы УЗФО. Для одновременного воздействия на пьезокерамический порошок статического давления и ультразвуковых колебаний использовалась установка, состоящая из силовой и колебательной систем.

Силовой системой установки, предназначенной для передачи статического давления порошку, служил гидравлический пресс усилием 50 тонн. Основными элементами колебательной системы, формирующей ультразвуковые колебания в порошке, являлись: 1) Ультразвуковой генератор (УЗГ) – источник электрических колебаний ультразвуковой частоты с выходной мощностью $(4,0 \pm 20\%)$ кВт и регулируемой частотой $(18 \pm 7,5\%)$ кГц; 2) магнотриксционный преобразователь – источник механических колебаний ультразвуковой частоты с акустической обратной связью, предназначенной для поддержания частоты УЗГ равной частоте резонанса преобразователя; 3) устройство передачи колебаний в пресс-форму со ступенчатым концентратором колебаний (рисунком 1). Преобразователь закреплялся на нижнем основании гидравлического пресса.

При разработке режимов ультразвукового формообразования в качестве основных технологических факторов, определяющих протекание процесса, рассматривали: удельное статическое

давление $P_{уд}$ (статическое усилие); массу взвеси частиц в пресс-форме (навеску) M ; амплитуду колебательного смещения A ; продолжительность воздействия УЗК t ; содержание пластификатора (поливинилового спирта) D .

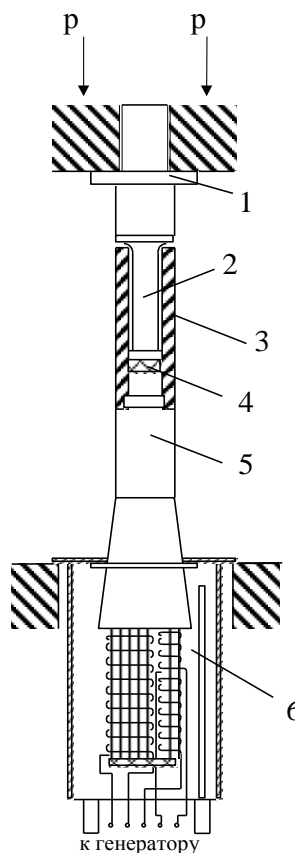


Рис. 1 Колебательная система установки для УЗФО изделий из порошков:

- 1 – отражатель, 2 – пуансон, 3 – матрица,
- 4 – уплотняемый порошок,
- 5 – ступенчатый концентратор колебаний,
- 6 – магнотриксционный преобразователь.

Критерием качества процесса являлась плотность пьезокерамической заготовки ρ .

Для заготовок из пьезокерамических материалов ТБК-3 и ЦТБС-3 в форме диска $\varnothing 20 \times 10$ мм значения указанных факторов представлены в таблице 1.

Формообразование контрольных образцов производили воздействием на навеску пьезокерамического порошка удельных статических давлений 50...70 МПа.

Таблица 1

Технологические режимы УЗФО

Материал	$P_{уд}$, МПа	M , кг	A , мкм	D , %	t , с	ρ , кг/м ³
ТБК-3	50...70	0,01...0,02	8,0...12,0	2,0	10,0...15,0	3400...3600
ЦТБС-3	50...70	0,01...0,02	8,0...12,0	2,0	10,0...15,0	5400...5600

Образование ультрадисперсных частиц. Формообразованию подвергали порошок материала ТБК-3 со средним размером частиц 550 нм. Такая

дисперсность достигалась предварительной механохимической активацией прокурсоров (карбонатов бария, кальция и оксида титана) в мельни-

це сверхтонкого измельчения центробежного и планетарного типа [6]. Температура спекания заготовок составляла 1350°C. Порошок керамики ЦТБС-3 содержал частицы основного материала – цирконата-титаната бария-свинца размерами 3...5 мкм и ультрадисперсные частицы SrCO_3 со средним размером 150 нм, которые готовили методом «химической сборки» [7]. Температура спекания заготовок составляла 1280°C.

Фазовый состав обожженных заготовок исследовали методом рентгеновской дифрактометрии на приборе ARL – X'TRA. Прибор предназначен для проведения качественного и количественного

фазового анализа поликристаллических образцов и тонких пленок методом порошковой рентгеновской дифракции (ПРД) [8, 9].

Результаты исследования фазового состава пьезокерамики ТБК-3 представлены на рисунке 2, а пьезокерамики ЦТБС-3 – на рисунке 3.

Анализировались образцы пьезокерамики, полученные при различных статических усилиях прессования (50 и 70 МПа), отличающиеся наличием или отсутствием в процессе формообразования ультразвука. Из рентгенограмм следует, что воздействие ультразвука не привело к изменению фазового состава пьезокерамик.

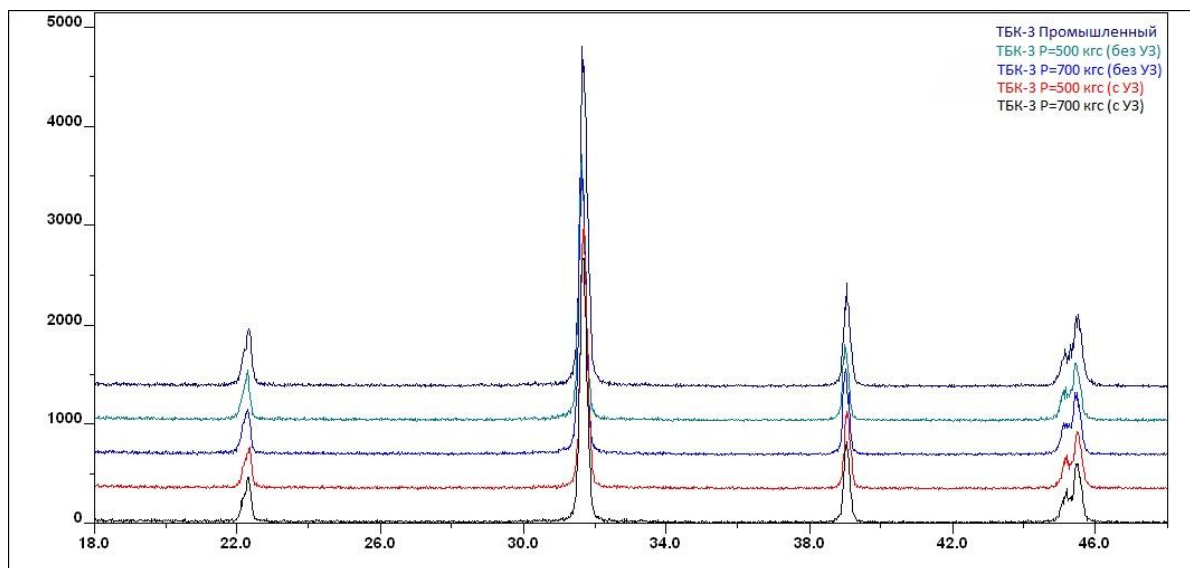


Рис. 2 Фазовый состав пьезокерамики ТБК-3

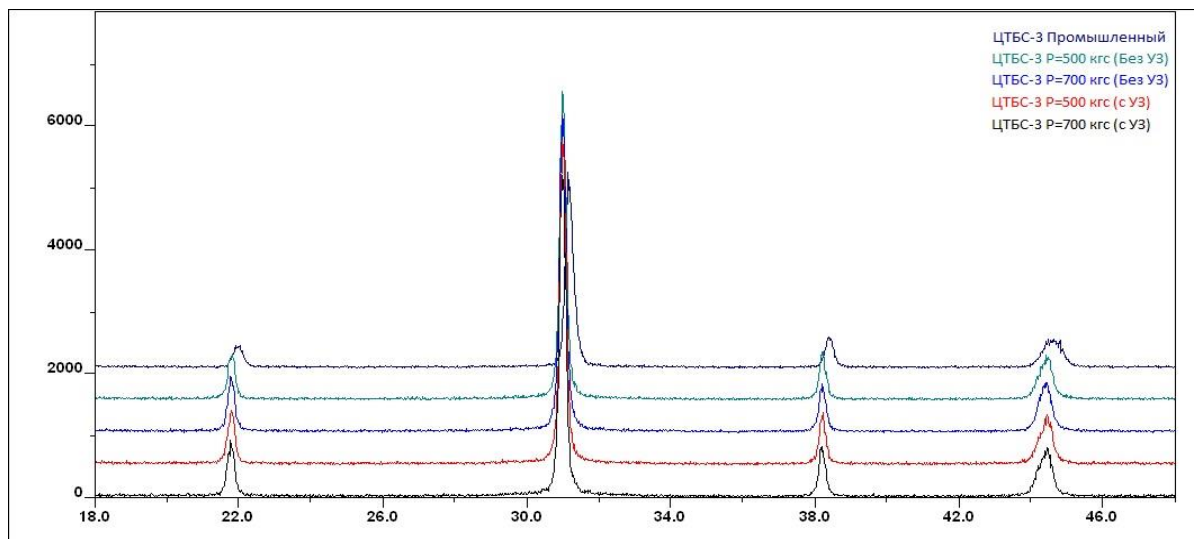


Рис. 3 Фазовый состав пьезокерамики ЦТБС-3

2. Электрофизические и физико-механические характеристики ПКЭ

Прошедшие высокотемпературный обжиг пьезокерамические заготовки подвергали механической обработке, металлизации и поляризации по

режимам, разработанным для рассматриваемых пьезокерамических материалов в промышленности. Измерение характеристик изготовленных пьезокерамических элементов проводили методом резонанса-антирезонанса [10]; расчетные

характеристики определяли по формулам, представленным в отраслевом стандарте [11].

Пьезокерамические элементы из материала ТБК-3. Исследовали элементы в форме диска Ø17,3×0,9 мм, изготовленные при статических усилиях прессования $P_{ст} = 50$ МПа и $P_{ст} = 70$ МПа без наложения ультразвука и способом УЗФО.

Результаты измерений и расчетов характеристик ПКЭ, усредненных для каждого режима формообразования по данным 10 определений,

представлены в таблице 2. Здесь $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ – относительная диэлектрическая проницаемость; $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; f_p и f_a – частоты резонанса и антирезонанса соответственно; d_{31} – поперечный пьезомодуль; K_p – радиальный коэффициент электромеханической связи; V_1^E – скорость звука при продольных колебаниях, $\rho_{ср}$ – плотность.

Таблица 2

Пьезокерамические элементы из материала ТБК-3

Режим	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	$tg\delta, \%$	$f_p, кГц$	$f_a, кГц$	$d_{31}, пКл/Н$	K_p	$V_1^E, м/с$	$\rho_{ср}, кг/м^3$
50 МПа	1140	0,9	176	181	49,0	0,24	4450	5700
50 МПа, УЗФО	1260	1,0	177	182	53,0	0,25	4470	5800
70 МПа	1250	1,0	176	181	53,0	0,24	4450	5700
70 МПа, УЗФО	1310	1,0	176	181	54,0	0,24	4450	5700

Анализ приведенных результатов показывает следующее.

1. Использование ультрадисперсных частиц позволяет получать пьезокерамические элементы из материала ТБК-3 с повышенными значениями электрофизических и механических характеристик.

2. Положительное воздействие ультразвука на электрофизические и физико-механические ха-

рактеристики проявляется уже при пониженных статических давлениях. Так, максимальное значение $\rho_{ср} = 5800$ кг/м³ получено при $P_{ст} = 50$ МПа.

Пьезокерамические элементы из материала ЦТБС-3. Изготавливали ПКЭ в форме диска Ø17,2×0,85 мм.

Режимы формообразования, а также результаты измерений и расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3

Пьезокерамические элементы из материала ЦТБС-3

Режим	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	$tg\delta, \%$	$f_p, кГц$	$f_a, кГц$	$d_{31}, пКл/Н$	K_p	$V_1^E, м/с$	$\rho_{ср}, кг/м^3$
50 МПа	3150	1,8	129	143	226	0,44	3200	7300
50 МПа, УЗФО	3190	1,9	127	150	254	0,53	3170	7300
70 МПа	3260	1,9	126	149	252	0,54	3160	7300
70 МПа, УЗФО	3140	1,9	127	149	246	0,53	3180	7300

Анализ приведенных результатов, показывает следующее.

1. Улучшение эксплуатационных характеристик ПКЭ обусловлено введением в состав пьезокерамики ЦТБС-3 ультрадисперсных частиц SrCO₃, а также воздействием на процесс формообразования пьезокерамики ультразвуковых колебаний.

2. При пониженных статических давлениях воздействие ультразвука приводит к дополнительному повышению пьезоэлектрического модуля d_{31} и радиального коэффициента электромеханической связи K_p .

частиц. Это позволяет повысить экономическую эффективность новой технологии.

Заключение

Ультразвуковое формообразование пьезокерамики, содержащей ультрадисперсные частицы, - перспективное направление в технологии изготовления пьезокерамических элементов.

Анализ характеристик ПКЭ из материала ЦТБС-3 показывает, что улучшение эксплуатационных характеристик ПКЭ может достигаться при введении малого количества ультрадисперсных

Литература

1. Агранат Б.А., Гудович А.П., Нежевенко Л.Б. Ультразвук в порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1986. 168 с.
2. Emeruwa E., Jarrige J., Mexmain J., Billy M., Bouzouita K. Powder compaction with ultrasonic assistance. // *Journal of materials science*. 1990. V. 25. № 2, Pt. 2. P. 1459 – 1462.
3. Пугачев С.И., Рытов Е.Ю. Ультразвуковое формообразование электрофизической керамики (обзор) // *Вестник ТвГУ. Серия «Физика»*. 2011. № 17. С. 30 – 74.
4. Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ'10): Труды международной научно-технической конференции. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2010. 634 с.
5. Марголин В.И., Жабрев В.А., Лукьянов Г.Н., Тупик В.А. Введение в нанотехнологию. СПб.: Изд-во «Лань». 2012. 464 с.
6. Панич А.А., Карюков Е.В. Альтернативный метод изготовления материала ТБК-3. Труды VI международной научно-технической конференции «Инновационные процессы пьезоэлектрического приборостроения и нанотехнологий». Анапа. 2008. С. 25 – 28.
7. Нестеров А.А., Панич А.Е., Масуренков К.С., Карюков Е.В. Влияние способа синтеза легированных перовскитовых фаз системы ЦТС на свойства материалов на их основе // *Научная мысль Кавказа*. 2010. №3 (63). С. 132 – 136.
8. *Analytical Techniques for thin films*. // Edited by K.N. Tu, R. Rosenberg. 1990. V. 27. Acad. Press. Tokyo, Toronto, London, New-York. P. 392-447.
9. Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Иванов А.Н. и др. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Металлургия. 1982. 631 с.
10. Пьезокерамические преобразователи. Справочник. / Под ред. С.И.Пугачева. Л.: Судостроение, 1984. 256 с.
11. Материалы пьезокерамические. Технические условия. ОСТ II 044-67. М.: 1987. 144 с.

References

1. Agranat B.A., Gudovich A.P., Nezhevenko L.B. Ultrasound in powder metallurgy. Moscow: Metallurgy. 1986. 168 p.
2. Emeruwa E., Jarrige J., Mexmain J., Billy M., Bouzouita K. Powder compaction with ultrasonic assistance. // *Journal of materials science*. 1990. V. 25. № 2, Pt. 2. P. 1459–1462.
3. Pugachev S.I., Rytov E.Yu. Ultrasound shaping electrophysical ceramics (review) // *Vestnic TvGU. Physics*. 2011. № 17. P. 30–74.
4. Nanotechnology of functional materials (NFM'10): Pros. of the International Science and Technical Conference. S-Pb.: Pub. Politechnical Univ. 2010. 634 p.
5. Margolin V.I., Zhabrev V.A., Lukyanov G.I., Tupik V.A. Introduction to nanotechnology. S-Pb.: Pub. «Lan'». 2012. 464 p.
6. Panich A.A., Karuykov E.V. An alternative method of obtaining the material of TBK-3. Pros. of the VI International Science and Technical Conference “Innovation processes of the piezoelectric engineering and nanotechnology. Anapa. 2008. P. 25–28.
7. Nesterov A.A., Panich A.E., Masurenkov K.S., Karyukov E.V. Effect of the synthesis method of doped perovskite phases of PZT on the properties of materials based on them. // *The scientific idea of Kavkaz*. 2010. №3 (63). С. 132–136.
8. *Analytical Techniques for thin films*. // Edited by K.N. Tu, R. Rosenberg. 1990. V. 27. Acad. Press. Tokyo, Toronto, London, New-York. P. 392–447.
9. Umanskij Ya.S., Skakov Yu.A., Ivanov A.N. et al. Crystallography, X-ray and electron microscopy. Moscow: Metallurgy. 1982. 631 p.
10. Piezoelectric converters. Handbook. / Editor S.I Pugachev. Leningrad: Shipbuilding. 1984. 256 p.
11. Piezoelectric materials. Technical specifications. OST II 044-67. Moscow. 1987. 144 p.

Управление в социальных и экономических системах

УДК 629.12.001.2

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ КРИТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ И МОРСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Алексеев Анатолий Владимирович

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры судовой автоматики и измерений
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: iapbgks@bkl.ru

Аннотация

Рассмотрены концептуальные аспекты развития критических объектов морской техники и морской инфраструктуры. Показано, что в современных условиях их развития первостепенное внимание при наращивании их возможностей и качества следует уделять системным требованиям, характеристикам и их оптимизации, обоснованию концептуальных аспектов их развития.

Это обусловлено лавинообразным возрастанием структурной и алгоритмической сложности объектов, ужесточением требований по качеству процессов их концептуального, исследовательского, эскизного, технического и конструкторского проектирования, технологической подготовки и организации производства, проведения испытаний на всех стадиях создания новых образцов техники и их модернизации. А также качественно новыми требованиями к подготовке обслуживающего персонала и выполнению ими функциональных обязанностей в строгом соответствии с установленными регламентами, обеспечивающими реализацию концепции развития.

Приведены конкретные примеры реализации концептуальных и системных требований на базе технологических решений и программных комплексов, зарегистрированных в ФСИС РФ.

Ключевые слова: информационные технологии, конкурентное преимущество, критические объекты, объекты морской техники и морской инфраструктуры, управление развитием, системные характеристики, оценка качества, агрегирование векторных показателей качества, оптимизация проектных и управленческих решений, интеллектуализация управления.

CONCEPTUAL ASPECTS OF DEVELOPMENT MANAGEMENT OF CRITICAL MARINE FACILITIES AND MARITIME INFRASTRUCTURE

Alekseev Anatoly Vladimirovich

the professor, Dr.Sci.Tech.,,
the professor of MARINE AUTOMATION AND MEASUREMENT,
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
tel: +7 (812) 455-23-63 e-mail: iapbgks@bk.ru

Abstract

The article discusses the conceptual aspects of the development of critical marine facilities and port infrastructure. It is shown that in the modern conditions of their development priority in building their capabilities and quality should be given to the system requirements, characteristics and their optimization, the justification of the conceptual aspects of their development.

This is due to an avalanche-like increase in structural and algorithmic complexity of the objects, the stricter requirements for the quality of their conceptual processes, research, sketches, technical and engineering design, process of preparation and organization of production, testing at all stages of the creation of new on-samples of machinery and their modernization. As well as qualitatively new training requirements for the staff and the performance of their functional duties in strict accordance with the established procedures, ensuring the implementation of the concept of development.

The article provides specific examples of the implementation of the conceptual and system requirements, technology-based solutions and software systems registered in FSIS of the Russian Federation.

Key words: information technology, competitive advantage, critical facilities, marine engineering and Maritime infrastructure, development management, system characteristics, quality assessment, aggregation vector of indicators of quality, optimization of design and management decisions, intellectualization control.

Введение

Современные объекты морской техники и морской инфраструктуры (ОМТИ) типа атомные суда, нефтеналивные суда, в том числе ледового класса танкеры, газовозы, химовозы и т.п., морские ледостойкие стационарные платформы типа «Приразломная» и другие, характеризуются целым рядом качественно новых свойств, определяемых спецификой внедряемых новых технологий, современным уровнем их развития.

Среди них определяющая роль сегодня, безусловно, принадлежит информационным технологиям (ИТ). Качественно новые возможности информационно-коммуникационных систем, систем обработки и визуализации информации открыли принципиально новые горизонты по масштабному расширению спектра функциональных возможностей и границ автоматизации, по миниатюризации средств и систем ОМТИ, по уровню и качеству используемых сервисов [1].

Вместе с тем, это привело к лавинообразному возрастанию структурной и алгоритмической сложности автоматизированных средств и систем ОМТИ, в том числе в защищенном исполнении (АСЗИ). Как следствие, это повлекло ужесточение требований к качеству процессов концептуального, исследовательского, эскизного, технического и конструкторского проектирования, технологической подготовки и организации производства, изготовлению АСЗИ, проведению испытаний на всех стадиях создания новых образцов ОМТИ и их модернизации [2]. Однако, специфика новых социально-экономических отношений в стране привела к определенному технологическому «упрощению» производственно-технологических отношений, резкому снижению практических требований к качеству и требованиям регламентирующих документов, к качеству процессов, продукции и услуг в целом [3]. Это породило целый ряд новых и существенно более критических проблем.

Наконец, объективное требование к повышению уровня и качества подготовки персонала, обслуживающего эти сложные эрготехнические комплексы и системы (ЭТС), выполнению им функциональных обязанностей в строгом соответствии с установленными техническими регламентами (число которых, кстати сказать, в последнее время стало также резко возрастать) вошло в противоречие с обратной тенденцией - практического снижения престижности многих технических специальностей, уровня знаний при подготовке и переподготовке специалистов, уровня научно-технического обоснования и развития соответствующих сегментов знаний.

Одной из причин тому следует считать резкое возрастание объема использования импортного оборудования, что, естественно, привело к существенному снижению востребованности профес-

сий разработчиков и проектировщиков, испытателей новых средств и широких слоев научно-технического персонала [4].

В сочетании с названными факторами анализ многих других аспектов управления развитием современных ЭТС позволяет утверждать, что большинство из ОМТИ следует рассматривать сегодня, прежде всего, как критически важные объекты повышенного риска. При этом, реализуемые в них современные ИТ относятся к числу ключевых, т.е. нарушение (или прекращение) функционирования которых может привести к потере на длительный период времени управления, разрушению инфраструктуры, необратимому негативному изменению (или разрушению) прогрессивного развития экономики отрасли, субъекта или административно-территориальной единицы, или существенному ухудшению безопасности жизнедеятельности персонала ОМТИ, угроз техногенного, природного характера и различных вариантов террористических проявлений [5].

Высокая критичность ИТ ОМТИ к внешним (условия среды использования) и внутренним (условия среды обеспечения функционирования, включая обусловленные негативным влиянием субъективных свойств операторов) факторам сегодня, как правило, «нейтрализуется» по пути повышения аппаратно-программной надежности используемых элементов и ОМТИ в целом и, главное, по традиционному пути резервирования контуров управления, повышения степени автоматизации решаемых в них задач. А также по пути повышения надежности, качества решения функциональных задач самым слабым звеном в автоматизированных контурах управления – лицами, принимающими управленческие решения (ЛПР), их обосновывающими (ЛОР) и исполняющими (ЛИР) с присущими им, как позитивными, так и рядом негативных свойств и факторов. Т.е. операторами в широком смысле этого термина. За счет совершенствования систем информационной, аналитической и интеллектуальной поддержки принятия ими решений (СИП) в ключевых контурах автоматизированного управления [6].

В этой связи представляется особо актуальным рассмотреть наиболее важные из концептуальных и системно-технических аспектов управления развитием критических ОМТИ.

1. Современные концептуальные и системные аспекты развития ОМТИ

Особо критичными в современных условиях, как показывает многочисленная практика, является, с одной стороны, качество концептуального и системного обоснования принимаемых организационных и технических решений при их разви-

тии. А с другой стороны, реализация в технических регламентах и практическое выполнение персоналом при эксплуатации этих требований, к числу которых, прежде всего, следует относить:

1. Требования по составу достигаемых АСзи ОМТИ целей и адекватности вытекающих из них функциональных задач, их непротиворечивости и достаточности для обеспечения требуемой валидности (обязательности достижения комплекса декларируемых целей).

2. Требования по структуре (архитектуре) АСзи ОМТИ, её оптимизации и безизбыточности, обоснованности и качества выбранных или разрабатываемых элементов с комплексом соответствующих свойств и характеристик.

3. Требования по взаимосвязи (согласованности, гармоничности) элементов в составе АСзи ОМТИ, качеству (проектному) и эффективности (реализуемому при эксплуатации проектного качеству) решения функциональных задач (требования по назначению).

4. Требования по верификации декларируемых и практических (обеспеченных) системных требований АСзи ОМТИ на всех этапах их жизненного цикла, включая, как этап создания опытных образцов и всесторонних их испытаний, так и во всех фазах их эксплуатации.

5. Требования по составу и уровню обоснованности формируемых новых требований к качеству АСзи ОМТИ в процессе и интересах обеспечения их эволюционного, либо революционного развития (резкого по наращиванию качества, архитектуре, составу, функциям, взаимосвязи и т.п.), а главное – обеспечения конкурентной способности (КС) и конкурентных преимуществ (КП).

В названный комплекс концептуальных и системных требований к АСзи ОМТИ традиционно входят также конкретные требования по устойчивости их функционирования (надежности, робастности и др.), по ресурсной затратности (организационной, временной, финансовой, материально-технической, трудовой и ряду других).

Кроме того, также требования по безопасности эксплуатации (обслуживания, службы персонала, экологической и др.), управлению аварийными ситуациями и авариями, а также борьбой за живучесть ОМТИ (прежде всего, корабля, судна), как их способностью противостоять последствиям аварийных повреждений, восстанавливая и поддерживая при этом в достаточной мере свои функциональные качества. Так, для судов, в первую очередь, их мореходные качества.

Весь этот комплекс концептуальных, системных, технических и организационных требований к управлению развитием ОМТИ должен быть обеспечен соответствующими методологическими и организационно-распорядительными решениями, комплексом документации, а также комплексом аппаратно-программных средств оценки, анализа и мониторинга достигаемого уровня системного качества и эффективности АСзи ОМТИ. Современных АСзи, которые представляют собой, как правило, сложные эрготехнические (человеко-машинные) и организационно-техни-

ческие совокупности взаимосвязанных элементов систем (подсистем, комплексов, устройств и т.п.), обеспечивающих во взаимосвязи решение общесистемных задач и достижение общесистемных, единичных целей.

В этих условиях, не взирая на известную структурную и функциональную сложность ОМТИ, а также, как следствие, методологическую сложность моделирования функционирования и оценки качества, имеет место негативная практика и тенденция количественной оценки качества только в части отдельных элементов без количественной оценки качества системы элементов в целом, что, естественно, может порождать соответствующие системные ошибки и концептуальное несоответствие (неадекватность).

Такой подход и практика, обусловленные, как правило, «осторожностью» Разработчика и его стремлением упростить процедуру сдачи Заказчику готовой продукции, являются заведомо ошибочными в системном аспекте, т.к. исключают возможность практической проверки, оценки и контроля валидности результатов. Под ней понимается при условии выполнения опытным образцом (изделием) поставленных в техническом задании (ТЗ) на научно-исследовательскую (НИР) или опытно-конструкторскую (ОКР) работу функциональных задач и требований оценку степени достижения поставленных в ТЗ целей, т.е. проверку одного из главных системных требований.

С другой стороны, замена конкретных квалиметрических оценок (оценок по измерению уровня качества), как это часто встречается практически, расчетной, либо экспертной оценкой возможности решения системных задач и достижения системных целей ОМТИ на уровне комиссий по приемке НИОКР (даже при наличии фрагментарных данных модельных экспериментов) не может быть адекватным эквивалентом. Это порождает, как правило, новые системные риски: фактической незавершенности выполняемых НИОКР; фактической невозможности адекватной оценки достигнутых результатов и эффективности ресурсных затрат; фактического отсутствия научно-методической «прозрачности» управления направлениями развития критических ОМТИ.

Другим важным системным аспектом управления современными критическими ОМТИ следует считать существенно более высокий и критический уровень риска, ресурсных затрат и потенциального ущерба при принятии ошибочных системных управленческих решений, в том числе при определении направлений развития соответствующих технологий и решений [7].

В этих условиях в дополнение к уже названному требованию обязательной количественной оценки качества ОМТИ в фактических условиях принятия решений следует считать целесообразным проведение квалиметрической сертификации перспективных технологических решений, формирование на их основе соответствующих баз данных и знаний с оценкой их конкурентной способности [8-9].

2. Методические аспекты управления развитием ОМТИ

Разработка программ и планов перспективного развития передовых технологий и развития ОМТИ в целом в системном аспекте управления развитием АСзи после решения задач концептуального и системного обоснования их развития представляется существенно более простым процессом. И, даже, включая такие сложные задачи, например, как форсированное решение проблем влияния негативных субъективных («человеческих») факторов на качество ОМТИ [10].

При этом, пожалуй, одним из самых значимых системных аспектов практического управления развитием критических ОМТИ, напрямую связанного с их ресурсной затратностью, является минимизация информационной, структурной, функциональной и других видов избыточности.

Методически решаться эта сложная научно-техническая задача должна решаться в ходе проектных обоснований на базе современных технологий многокритериальной и много модельной (полимодельной) оптимизации с «полномасштабным» использованием всего «арсенала» современных научных достижений. Что, однако, сегодня носит подчас «поверхностный» характер.

Так, под информационной δ_I (структурной δ_C , функциональной δ_Φ) избыточностью понимается мера возможного сокращения объема информации Δ_I (соответствующего числа структурных элементов в составе системы Δ_N , числа решаемых функциональных задач Δ_F с соответствующими межэлементными связями Δ_Z), при котором с заданной точностью $\Delta Q_{доп}$ не ухудшается качество системы $Q \geq Q_{ТЗ}$, где $Q_{ТЗ}$ – проектное значение качества АСзи, определяемое требованиями технического задания (ТЗ).

В процессе решения задач системного анализа и последующего синтеза АСзи ОМТИ именно поиск такого сочетания характеристик, при котором обеспечивается максимизация показателя качества $Max Q \geq Q_{ТЗ}$ и минимизация избыточности $Min \delta(\delta_\Phi, \delta_C, \delta_I, \dots)$ является, как можно показать, наиболее значимым критерием вариантного проектирования АСзи ОМТИ.

Собственно, сам процесс принятия многокритериального и полимодельного решения в соответствии с рисунком 1 можно представить в виде сложного процесса обоснованного выбора одной из многочисленных альтернатив $j \in [0, J]$, удовлетворяющей ряду условий (наибольшего качества Q_{Max} , минимальной избыточности δ_{Min} , наибольшего конкурентного превосходства K_{Max} , устойчивости развития U_{Max} и многих других) и, прежде всего, условию оптимального

(наилучшего $j_{Opt} \in [0, J]$ из возможных альтернативных J вариантов) выбора вида

$$j_{Opt} = ArgOpt(LPP, Q_{Max}, \delta_{Min}, K_{Max}, \dots) \quad (1)$$

Следует подчеркнуть важную особенность и методологическое теоретическое положение синтеза оптимальных многокритериальных решений – ведущую роль и эксклюзивное право в этом процессе лиц, принимающих решения (ЛПР).

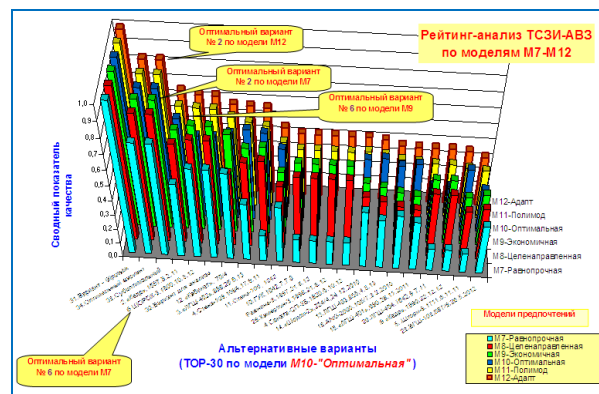


Рис. 1. Пример многокритериальной оценки качества и обоснования принятия оптимального решения по выбору технических средств класса акустико-вибраоакустической защиты (ТСЗИ-АВЗ)

Это положение означает то важное обстоятельство, что в замкнутом контуре управления ЛПР с их функциональным свойством и соответствующим качеством принимать безошибочные с $Q > 0$, рациональные с $Q > Q_{ТЗ}$, субоптимальные с $Q \approx Q_{Max}$ и оптимальные с $Q = Q_{Max}$ решения являются не менее, чем равнозначным элементом эрготехнических систем типа ОМТИ.

При этом, очевидным следствием отмеченного является особая необходимость сегодня при анализе, синтезе и оптимизации ОМТИ, в том числе, как критических системах, непосредственно предусматривать системную возможность, как максимизации позитивных свойств ЛПР (решение креативных задач, принятие «нестандартных» (нерегламентированных) результативных решений, принятие решений в условиях информационного дефицита и неформализованных условиях, смены концептуальных и целевых векторов и др.), так и нейтрализации проявления их возможных негативных свойств (ошибки принятия решений по причинам ограниченной компетентности, практических навыков и опыта, психофизиологической усталости и ситуационной неготовности (боязни), возможности нелегитимности и смены мотивационного вектора и др.).

Условно называемый сегодня «человеческий фактор» сегодня становится в ряде случаев самым критическим фактором и требует поиска качественно новых концептуальных, системных, организационно-технических и технологических ре-

шений его учета при создании и развитии современных конкурентно способных ОМТИ [10-12].

3. Методические аспекты моделирования качества ОМТИ

Названные аспекты управления развитием ОМТИ, включая использование критериев проектирования АСзи ОМТИ типа $\delta \rightarrow Min$, будут только тогда иметь значение, если будет доступен аппарат моделирования главного показателя любой системы, а именно – критерия (меры соответствия предназначению) и показателя (численного выражения критерия) её качества Q .

Однако, широко распространенных и общепризнанных методических решений этой научно-технической задачи применительно к конкретным практическим задачам сегодня крайне мало. В то время, как значимость вопроса, особенно для сложных ЭТС стремительно возрастает.

Одним из перспективных направлений и методов решения задач данного класса наряду с эвристическими методами, методом паритета, линейно-экспоненциальными методами и подобными, следует считать уже достаточно изученные так называемые формальные методы решения многокритериальных задач на основе агрегирования векторных критериев [11].

В настоящее время известен целый ряд алгоритмов агрегирования частных показателей качества (ЧПК) в групповые (ГПК), модельные (МПК) и

агрегированный (сводный) показатель качества (АПК, СПК). В систематизированном виде они приведены в таблице из [11] с тем отличием, что в нее добавлены становящиеся весьма предпочтительными в последнее время так называемый метод гармонической оптимальности [12], метод ранговой партнерской сертификации качества [8-9], метод анализа, синтеза и оптимизации решений [3,6,7,12] и некоторые другие.

Так. МГО удачно сочетает в себе преимущества МРО с МСК. При этом, получаемые оценки по алгоритму МГО занимают компромиссное промежуточное положение между оценками по образующим его методам [10,12].

Принципиальным преимуществом метода РПС [8,9] следует считать методическую возможность минимизации негативного влияния субъективных (человеческих) факторов экспертов за счет учета их компетенции по критерию индекса компетентности, автоматического режима формирования результатов обработки в виде проекта протокола экспертного оценивания соответствующих объектов анализа, а также обеспечения конфиденциальности оценок каждым экспертом с их групповой обработкой, верификацией и оценкой валидности методом принятия коллегиального решения экспертным советом в целом, формированием соответствующей единой базы данных и знаний по всему классу средств ОМТИ.

Таблица 1
Основные методы агрегирования векторных критериев и оптимизации решений

Методы агрегирования векторных критериев	Математическая модель алгоритмов агрегирования и оптимизации решений	Сравнительные свойства, рекомендации
1. Методы свертки ЧПК в АПК: 1.1. Метод равномерной оптимальности АПК по ЧПК (МРО)	Аддитивный алгоритм свертки k ЧПК ω_k с весовыми коэффициентами q_k вида: $W_j^A = \sum_k q_k \times \omega_k, \quad j_{Opt}^A = Max W_j^A$	Определение весовых коэффициентов методом сводных (МСП) или рандомизированных (МРСП) показателей
1.2. Метод справедливого компромисса по ЧПК (МСК)	Мультипликативный алгоритм свертки k ЧПК ω_k с весовыми коэффициентами q_k вида: $W_j^M = \prod_k \omega_k^{q_k}, \quad j_{Opt}^M = Max W_j^M$	Определение весовых коэффициентов по МСП или МРСП
1.3. Метод среднестепенной функции оптимальности (МСФ)	Среднестепенной алгоритм свертки вида: $W_j^C = (1/K) \times \sum_{k=1}^K [W_k^p(\omega_k)]^{1/p}, \quad j_{Opt}^C = Max W_j^C$	Проблема обоснования параметра $p \in (-\infty, +\infty)$
1.4. Метод гармонической оптимальности (МГО)	Гармонический алгоритм свертки вида: $W_j^G = (W_j^A \times W_j^M)^{1/2}, \quad j_{Opt}^G = Max W_j^G$	Одновременное сочетание преимуществ МРО и МСК
2. Методы граничных оценок АПК: 2.1. Метод пессимистической оценки ЧПК и гарантированного результата АПК (МГР)	Алгоритм максимизации минимальной (гарантированной) эффективности вида: $W_j^{GP} = Max [W_j(\omega_{k_Min})], \quad j_{Opt}^{GP} = Max W_j^{GP}$	Тактика «замораживания» (пессимистического) резервов развития
2.2. Метод максималь-	Алгоритм максимизации максимальной	Тактика «фиктивной»

ной (гипотетической) эффективности (ММЭ)	(гипотетической) эффективности вида: $W_j^{MЭ} = \text{Max}[W_j(\omega_{k_Max})]$, $j_{Opt}^{MЭ} = \text{Max}W_j^{MЭ}$	(оптимистической) эффективности
3. Методы ограничения АПК: 3.1. Метод последовательных уступок по АПК (МПУ)	Алгоритм последовательных уступок ΔW по $(k-1)$ критериям кроме $k=g$ вида: $j_{Opt}^{IV} = \text{ArgMax}\{W_j - [W(\omega_g) - \Delta W]\}$	Проблема оценки допустимых уступок ΔW
3.2. Метод ведущего ЧПК и фиксированных ограничений АПК (МФО)	Алгоритм перевода $(k-1)$ критериев в ограничения за исключением $k=g$ вида: $j_{Opt} = \text{ArgMin}[W_g^{\Phi O}(\omega_g) - W_j]$	Проблема оценки ведущего ЧПК $W_j^{\Phi O}(\omega_g)$
4. Метод целевого программирования: 4.1. Метод идеальной точки по АПК (МИТ)	Алгоритм идеальной (эквилибрантной) точки вида: $j_{Opt}^{IT} = \text{ArgMinDist}(W_{Max}, W_j)$	Проблема синтеза идеальной точки W_{Max} , точности оценок
4.2. Метод минимизации сумм нормированных отклонений АПК (ММО)	Алгоритм минимизации сумм отклонений АПК от целевого значения W_u с весом μ_k вида: $j_{Opt}^{MO} = \text{ArgMin}[\sum_k [\mu_k \times W(\omega_k) - W_u(\omega_k) ^r]^{1/r}$	Проблема «утопичности» точки $W_u(\omega_k)$ и оценки $r \in [1, +\infty)$
5. Методы поиска компромисса: 5.1. Метод эвристических решений (МЭР)	Алгоритм формируется и оптимизируется ЛПР итерационно вида: $j_{Opt}^{\text{ЭР}} = \text{ArgOpt}[\text{ЛПР}, \text{Extr}(W_j^{\text{ЭР}}, k)]$	Проблема синтеза ЛПР структуры алгоритма, $W_j^{\text{ЭР}}, k$
5.2. Метод комбинированного решения многовекторных задач (МКР)	Алгоритм решения многовекторных задач вида: $j_{Opt}^{KP} = \text{ArgMax}\{\text{Min}[\text{Extr}(W^{KP}(\omega_k))]\}$	Проблема синтеза алгоритма Extr, W^{KP}
6. Методы интерактивного программирования: 6.1. Метод анализа и синтеза при информационном дефиците (АСПИД)	На основе алгоритма равномерной оптимальности с использованием метода имитационного моделирования для оценки весовых коэффициентов при введении отношений попарного предпочтения ЧПК. Прямое и обратное решение задачи выбора решений.	Интерактивное использование программного комплекса реализации метода АСПИД: «ASPID-W», «APIS»
6.2. Метод анализа иерархий (МАИ)	На основе алгоритма равномерной оптимальности с использованием 9-уровневой модели предпочтений для оценки весовых коэффициентов, их структуризацией и визуализацией	Интерактивный вариант программной реализации МАИ: «MPRIORITY»
7. Полимодельный метод: 7.1. Метод отношений критериев (по ЧПК, ГПК)	Алгоритм максимизации (минимизации) отношения отдельных m, n ЧПК вида: $W_j^{OK} = \text{Extr}(\omega_m / \omega_n)$	Проблема интерпретации отношения критериев, их выбора, получаемых оценок
7.2. Метод модельных предпочтений и качественной ранговой оптимизации (КРОПУР)	Одновременное использование нескольких методов, моделей предпочтений, вариантов условий и оценивания с агрегированием получаемых оценок АПК и их ранжированием	Взаимная верификация и актуализация моделей, условий и оценок АПК, решений
7.3. Метод анализа, синтеза и оптимизации решений (АСОР)	Многовариантная КРОПУР с синтезом решений на основе метода корневой чувствительности и их многомерной визуализацией, ранжированием, интерпретацией и оптимизацией	Типизация моделей предпочтений с ранжированием оценок АПК и решений
7.4. Метод ранговой партнерской сертификации качества (РПС)	Минимизация негативного влияния субъективных факторов экспертов за счет учета их компетенции, автоматического формирования результатов обработки и их групповой оценки	Повышение точности оценивания за счет автоматизации процедур оценки и выбора

Поскольку каждый из предлагаемых методов базируется на соответствующих модельных ограничениях, а стало быть, приводящих к соответствующим методическим погрешностям, особый

интерес и, особенно, для сложных ЭТС, представляет так называемый полимодельный метод, как позволяющий существенно уменьшить мето-

дические погрешности многокритериального оценивания качества ОМТИ.

4. Методические аспекты оптимизации принятия решений

В основе принятия проектных и управленческих решений по управлению развитием ОМТИ лежит процедура альтернативного выбора, модель которого может быть представлена следующим образом.

Для наглядности представим, что в выборе проектного (операторы типа ЛОР) и управленческого (операторы типа ЛПП) решения участвуют S сторон, каждая из которых заинтересована в максимизации соответствующего ("своего") показателя $W_1, W_2, W_3, \dots, W_S$. При этом t -я сторона может выбрать любое допустимое для нее решение $r_t \in R_t$. Отметим, что решение, выбранное этой стороной, влияет на эффективность всех остальных. Это означает, что показатель эффективности любой стороны зависит от совокупности допустимых решений $\{r_1, r_2, \dots, r_s\}$ всех сторон, т.е. $W_t = W_t(u_1, u_2, \dots, u_s), t=1, 2, \dots, S$.

Отношение предпочтения решения R_t^* в сравнении с решением R_t сформулируем в виде

$$W_t(R_1, \dots, R_t^*, \dots, R_S) > W_t(R_1, \dots, R_t, \dots, R_S). \quad (2)$$

В условиях, когда стороны самостоятельно выбирают свои решения, известный принцип оптимальности Парето (принцип единогласия) может быть сформулирован следующим образом:

Если для всех сторон S допустимые решения $R_1^, R_2^*, \dots, R_S^*$ предпочтительнее решений R_1, R_2, \dots, R_S , то последние не будут приняты (единогласно отвергнуты).*

Практически совокупность решений $\{R_1^*, R_2^*, \dots, R_S^*\}$ оказывается неединственной и образует некоторое множество R решений, оптимальных по Парето. Любой набор решений из этого множества не может быть улучшен сразу по всем показателям $W_1, W_2, W_3, \dots, W_S$. В силу этого, как известно, решения, оптимальные по Парето, называются также неуплучшаемыми.

Любое решение из множества R является неуплучшаемым. Выбор конкретного решения из множества оптимальных по Парето может быть осуществлен лишь на основе компромисса на основе переговоров ЛПП всех заинтересованных сторон. Принятие какого-либо конкретного решения $\{R_1^*, R_2^*, \dots, R_S^*\}$ из множества Парето является при этом, как известно, прерогативой исключительно ЛПП и осуществляется, как правило, на основе его субъективных предпочтений.

С другой стороны, все стороны S , действуя совместно, как известно, не могут увеличить эффективность своих решений.

Более того, согласно принципа равновесия по Нэшу, ни одна из сторон не заинтересована в изменении решения, входящего в ситуацию равновесия, если все остальные стороны сохраняют решения, соответствующие этой ситуации.

Наконец, показатели эффективности решений сторон имеют неодинаковые значения в различных равновесных ситуациях, а ситуации, оптимальные по Парето, эквивалентны для всей совокупности участников конфликта. Поэтому выбор какой-то одной ситуации из множества оптимальных по Парето должен осуществляться путем проведения соответствующих переговоров между сторонами и представляет собой компромиссное решение этих сторон.

Таким образом, переговорный процесс, направленный на выработку компромиссных соглашений, является существенным фактором разрешения конфликтных ситуаций многокритериальной оптимизации ПУР, а Парето-оптимальные решения могут определяются только общим интересом всех сторон. Причем, коалиционные результаты оказываются лучшими, чем индивидуальные.

В этой связи, выработка специальных технологических процедур ведения переговоров по выбору решений, базирующихся на расширении взаимной информированности сторон об их решениях и намерениях, становится по-новому актуальным и востребованным, как показано ниже.

5. Использование и реализация

В контексте рассмотренных выше концептуальных и системно-технических аспектов управления развитием критических ОМТИ рассмотрим ниже следующие варианты их использования и реализации.

5.1. В полном соответствии с выше рассмотренными методическими аспектами оптимизации ПУР в [8] предложена методология и технология РПС [9], являющаяся наиболее предпочтительной в условиях оптимизации ПУР для современных сложных, а, тем более, критических ЭТС, включая ОМТИ (таблица 1).

Метод РПС основан на одновременном использовании нескольких моделей (сторон S) и вариантов условий оценивания с соответствующим взвешиванием оценок и используемых моделей. Такой подход, как показывает практика, позволяет существенно снизить методические погрешности оценивания, соответствующие модельные ограничения.

Более того, этот подход позволяет обоснованно применять и наращивать (развивать) возможности исходных методов с учетом их позитивных и специфических (негативных) свойств.

Именно этот подход реализован в методе и одноименной автоматизированной системе поддержки принятия решений (АСППР) на базе про-

граммного комплекса «Программа квалиметрической ранговой оптимизации проектных и управляющих решений (КРОПУР)», зарегистрированной в Федеральной службе интеллектуальной собственности (ФСИС) за № 2013612649, 11.03.2013. Один из вариантов использования технологии КРОПУР приведен на рис. 2.

Рис. 2. Пример интерфейса КРОПУР при оптимизации выбора для ОМТИ технологии класса СИП БЖКС

5.2. В контексте названных проблемных аспектов управления развитием АСЗИ ОМТИ конкретные варианты реализации приведенных системных требований использованы в технологических решениях и программных комплексах [1, 3, 6, 10, 12], также зарегистрированных в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (ФСИС) за номером 2013612929, 18.03.2013, «Программа квалиметрического анализа и оценки конкурентной способности технологических решений по информационной поддержке принятия решений судоводителем (QSWOT)». В том числе в QSWOT использованы в различных комбинациях алгоритмы агрегирования векторных критериев (согласно табл. 1) 1.1, 1.2, 6.1. Интерфейс АСППР приведен на рис. 3.



Рис. 3. Главная экранная форма АСППР с режимом экспресс-оценок QSWOT

5.3. Алгоритмы агрегирования векторных критериев 1.1, 1.2, 7.2 в различных комбинациях реализованы также в «Программном модуле экспертного квалиметрического оценивания уровней технологических решений по безопасности эксплуатации, локализации аварий и борьбе за живучесть корабля, судна (МКО)», зарегистрированном в ФСИС за № 2014613608, 31.03.2014.

Пример интерфейса программного модуля МКО приведен на рис. 4.

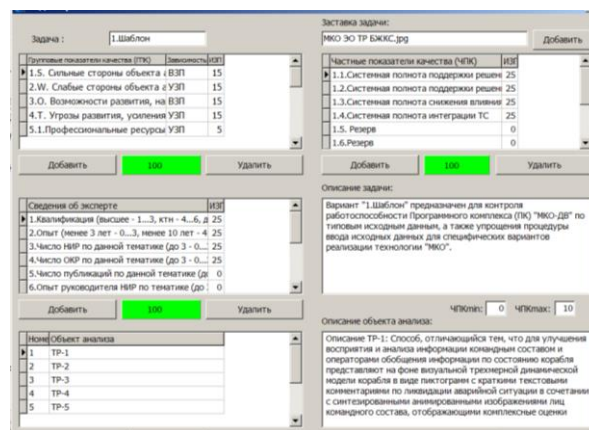


Рис. 4. Пример интерфейса МКО при описании объектов анализа и системы критериев

5.4. На рис. 5 представлен вариант реализации комплекса алгоритмов агрегирования векторных критериев 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 6.1, 7.2, 7.4 в составе технологического образца «Автоматизированной системы информационно-аналитической и интеллектуальной поддержки операторов при мониторинге, оценке обстановки, контроле и управлении состоянием организационно-технических систем по безопасности эксплуатации, локализации аварий и борьбе за живучесть корабля, судна (АСИП МОКУ)», зарегистрированном в ФСИС за № 2014613622, 1.04.2014.

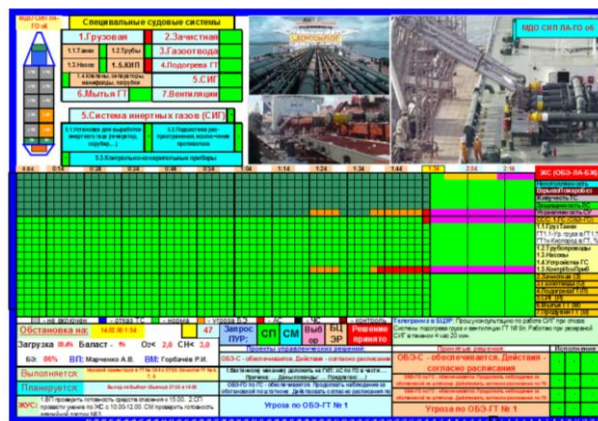


Рис. 5. Пример интерфейса технологического образца АСИП МОКУ

5.5. На рис. 6 представлен вариант мониторинга ЧПК, ГПК и АПК в составе «Программного комплекса Макетного действующего образца Системы информационной поддержки судоводителей при обеспечении безопасности эксплуатации в части грузовых операций, локализации аварийных ситуаций, аварий и борьбы за живучесть морских объектов повышенного риска (ПК МДО СИП ЛА-ГО о3)», зарегистрированном в ФСИС за № 2014611813, 29.04.2014.

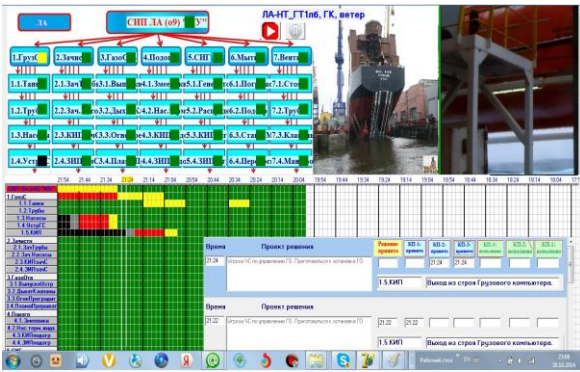


Рис. 6. Пример интерфейса ПК МДО СИП ЛА-ГО о3

Комплексная математическая модель поддержки принятия решений ЛОР, ЛПР, ЛИР, как одной из критических задач управления современными сложными ЭТС [10-12] типа ОМТИ, приведена на рис. 7.

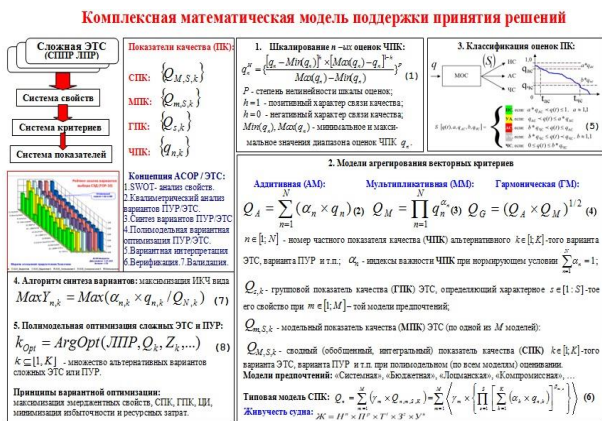


Рис. 7. Комплексная математическая модель поддержки принятия решений: системные аспекты

В данной модели учтены и реализованы многие из сформулированных выше концептуальных и системных требований, наиболее значимых аспектов управления развитием АСзи ОМТИ, в том числе в форме АСППР «АСИП МОКУ», «ПК МДО СИП ЛА-ГО о3» и отдельных технологических решениях «ИП.1», «АПД» [1, 12].

При этом, к числу основных концептуальных и системных решений по обеспечению требований к управлению качеством АСзи ОМТИ при решении задач поддержки принятия решений ЛОР, ЛПР, ЛИР, обеспечивающих соответствующие конкурентные преимущества [1, 3 - 12], следует отнести:

- агрегирование ЧПК в ГПК, МПК и АПК, их визуализацию и мониторинг в реальном масштабе времени с оперативным и упреждающим управлением качеством функционирования АСзи;
- синтез вариантов АСзи ОМТИ на основе максимизации индексов корневой чувствительности (ИКЧ), определяемых соотношением

системных показателей качества типа АПК и ЧПК;

- оптимизацию сложных ЭТС и принимаемых проектных (при создании) и управленческих (при эксплуатации) решений на основе максимизации АПК АСзи ОМТИ и их прогнозирования;
- малоизбыточную визуализацию данных в составе ключевых ГПК, МПК и АПК для обеспечения сопряжения всего комплекса эрготехнических характеристик ОМТИ, включая АСзи;
- максимизацию качества информационно-аналитической и интеллектуальной поддержки принятия решений на основе автоматической (оперативной) оценки и мониторинга в реальном масштабе времени ключевых системных показателей качества по каждому из элементов и АСзи ОМТИ в целом с учетом возможности их прогнозирования и упреждением во времени до (20...30) минут и более, что весьма существенно [12].

Заключение

В результате выполненного анализа концептуальных аспектов управления развитием критических ОМТИ могут быть сделаны следующие основные выводы:

1. В современных условиях развития АСзи в составе ОМТИ первостепенное внимание при наращивании их возможностей и качества, для обеспечения конкурентной способности и конкурентных преимуществ следует уделять качеству обоснования и качеству реализации концептуальных и системных требований, соответствующих системно-техническим характеристикам, в том числе их верификации и оценке валидности при проведении испытаний всех видов.

2. В качестве ключевого условия эффективного управления развитием средств автоматизации и ОМТИ в целом, обеспечения их конкурентных преимуществ, следует рассматривать оптимизацию системных показателей качества в процессе проектирования АСзи в составе ОМТИ, а также в процессе эксплуатации при мониторинге в реальном масштабе времени и обеспечение эффективной эксплуатации.

3. Современный уровень развития отечественных информационных технологий управления концептуальным и технологическим развитием систем автоматизации ОМТИ, как сложных и критических эрготехнических систем, позволяет уже сегодня ставить и успешно решать задачу создания конкурентно способных отечественных средств и систем ОМТИ, в том числе импортозамещающих. А также задачу их эффективного использования и управления развитием, но при обязательном условии концептуально, системно-технически, методологически, научно-технически и технологически обеспеченном принятии проектных и управленческих решений.

Литература

1. Волков В.И., Тychинин И.Ю., Алексеев А.В. Системные аспекты управления развитием современных критических объектов морской техники и морской инфраструктуры – Региональная информатика (РИ-2014). XIV Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2014)». Санкт-Петербург, 29-31 октября 2014 г.: Материалы конференции. \ СПОИСУ. – СПб, 2014. С. 447-448.
2. Морская радиоэлектроника: Справочник / И.В.Соловьев, Г.Н.Корольков, А.А.Бараненко, М.Н.Баранов, А.В.Алексеев, Л.С.Васильев и др.; Под ред. В.А.Кравченко. СПб.: Политехника, 2003. – 246 с.
3. Алексеев А.В. Технология и программный комплекс квалиметрической ранговой оценки качества сложных информационно-аналитических систем / Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции МОРИНТЕХ-ПРАКТИК «Информационные технологии в судостроении–2008». – СПб., ОАО «Северные верфи», 19.06.2008, с.110-118.
4. Алексеев А.В. Управление технической системой безопасности в промышленности / Системы безопасности. Журнал для руководителей и специалистов в области безопасности, 2004, № 6 (60), с. 68 - 73.
5. Алексеев А.В., Орлов К.М. Информационно-аналитическое обеспечение современных специальных информационно-управляющих комплексов: состояние, проблемы и перспектив развития. Статья, сборник «Состояние, проблемы и перспективы разработки корабельных информационно-управляющих комплексов. / Сборник докладов научно-технической конференции. – М.: ОАО «Концерн «Моринформсистема-Агат», Москва, 2010, с.69-75.
6. Алексеев А.В. Методология синтеза системотехнических решений автоматизации процессов борьбы за живучесть судов повышенного риска /Актуальные проблемы морской энергетики: материалы третьей Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2014, с. 181 с.
7. Алексеев А.В. Оптимизация проектных и управленческих решений при комплексном обеспечении безопасности большого города // Безопасность большого города / Сб. ст.под ред. Э.И.Слепьяна. – Санкт-Петербург: Издательство Сергея Ходова, 2007, с. 400-418.
8. Смольников А.В, Алексеев А.В., Антипов В.В., Бобрович В.Ю. Ранговая сертификация современных эрготехнических систем, как реальный способ повышения конкурентоспособности объектов морской техники и морской инфраструктуры – Морской Вестник, 2013, № 1 (10), с. 55 - 59.
9. Алексеев А.В., Антипов В.В., Бобрович В.Ю., Смольников А.В. Концепция и технология ранговой партнерской сертификации объектов морской техники и инфраструктуры / Материалы конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2014). ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». СПб., 7-9.10.2014 – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. С. 29-34.
10. Алексеев А.В. Технология квалиметрической ранговой оптимизации проектных и управленческих решений / Труды Международной Научной Школы «Моделирование и Анализ Безопасности и Риска в Сложных Системах (МА БР-2007)» – СПб., ГОУ ВПО «СПбГУАП» 2007. – с. 285 – 290.
11. Основы проектирования систем защиты информации – СПб.: СПбГМТУ, 2008 г. – 71 с. (с. 40).
12. Алексеев А.В. Перспективы развития технологий управления электроэнергетическими системами танкерного флота /Актуальные проблемы морской энергетики: Материалы четвертой Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции. Посвящается 125-летию профессора, д.т.н., заслуженного деятеля науки и техники В.А. Ваншейдта. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2015. – 205 с. (С. 92-95).

References

1. Volkov V.I., Tychinin I.Ju., Alekseev A.V. Sistemnye aspekty upravlenija razvitiem sovremennyh kriticheskikh ob'ektov morskoy tehniky i morskoy infrastruktury. *Regional'naja informatika (RI-2014)*. XIV Sankt-Peterburgskaja mezhdunarodnaja konferencija «Regional'naja informatika (RI-2014)». Sankt-Peterburg, 29-31 oktjabrja 2014 g.: Materialy konferencii. SPOISU. SPb, 2014. S. 447-448.
2. Morskaja radioelektronika: Spravochnik. I.V.Solov'ev, G.N.Korol'kov, A.A.Baranenko, M.N.Baranov, A.V.Alekseev, L.S.Vasil'ev i dr.; Pod red. V.A.Kravchenko. SPb.: Politehnika, 2003. 246 s.
3. Alekseev A.V. Tehnologija i programmnyj kompleks kvalimetricheskoj rangovoj ocenki kachestva slozhnyh informacionno-analiticheskikh system. *Materialy IX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii MORINTEH-PRAKTIK «Informacionnye tehnologii v sudostroenii–2008»*. SPb., ОАО «Severnye verfi», 19.06.2008, s.110-118.
4. Alekseev A.V. Upravlenie tehnicheckoj sistemoj bezopasnosti v promyshlennosti. *Sistemy bezopasnosti. Zhurnal dlja rukovoditelej i specialistov v oblasti bezopasnosti*, 2004, № 6 (60), s. 68 - 73.
5. Alekseev A.V., Orlov K.M. Informacionno-analiticheskoe obespechenie sovremennyh special'nyh informacionno-upravljajushih kompleksov: sostojanie, problemy i perspektiv razvitija. *Stat'ja, sbornik «Sostojanie, problemy i perspektivy razrabotki korabel'nyh informacionno-upravljajushih kompleksov. Sbornik dokladov nauchno-tehnicheckoj konferencii. M.: ОАО «Koncern «Morinformсистема-Агат», Moskva, 2010, s.69-75.*

6. Alekseev A.V. Metodologija sinteza sistemotehnicheskikh reshenij avtomatizacii processov bor'by za zhivuchest' sudov povyshennogo riska. *Aktual'nye problemy morskoy jenergetiki: materialy tret'ej Vserossijskoj mezhotraslevoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2014, s. 181 s.
7. Alekseev A.V. Optimizacija proektnyh i upravlencheskih reshenij pri kompleksnom obespechenii bezopasnosti bol'shogo goroda. *Bezopasnost' bol'shogo goroda. Sb. st.pod red. Je.I.Slepjana*. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo Sergeja Hodova, 2007, s. 400-418.
8. Smol'nikov A.V., Alekseev A.V., Antipov V.V., Bobrovich V.Ju. Rangovaja sertifikacija sovremennyh jergotehnicheskikh sistem, kak real'nyj sposob povyshenija konkurentosposobnosti ob#ektov morskoy tehniki i morskoy infrastruktury. *Morskoy Vestnik*, 2013, № 1 (10), s. 55 - 59.
9. Alekseev A.V., Antipov V.V., Bobrovich V.Ju., Smol'nikov A.V. Konceptija i tehnologija rangovoj partnerskoj sertifikacii ob#ektov morskoy tehniki i infrastruktury. *Materialy konferencii «Informacionnye tehnologii v upravlenii» (ITU-2014)*. GNC RF OAO «Koncern «CNII «Jelektropribor»». Spb., 7-9.10.2014. SPb.: OAO «Koncern «CNII «Jelektropribor»», 2014. S. 29-34.
10. Alekseev A.V. Tehnologija kvalimetriceskoy rangovoj optimizacii proektnyh i upravlencheskih reshenij». *Trudy Mezhdunarodnoj Nauchnoj Shkoly «Modelirovanie i Analiz Bezopasnosti i Riska v Slozhnyh Sistemah (MA BR-2007)»*. Spb., GOU VPO «SPbGUAP» 2007. s. 285 – 290.
11. Osnovy proektirovanija sistem zashhity informacii. SPb.: SPbGMTU, 2008 g. 71 s. (s. 40).
12. Alekseev A.V. Perspektivy razvitija tehnologij upravlenija jelektrojenergeticheskimi sistemami tankernogo flota. *Aktual'nye problemy morskoy jenergetiki: Materialy chetvortoj Vserossijskoj mezhotraslevoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Posvjashhaetsja 125-letiju professora, d.t.n., zaslužennogo dejatelja nauki i tehniki V.A. Vanshejdta*. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2015. 205 s. (S. 92-95).

УДК 621.3.083: 519.623

100 ЛЕТ ТЕОРЕМЫ ОТСЧЕТОВ: ИССЛЕДОВАНИЯ, ОБОБЩЕНИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ

Алексеев Анатолий Владимирович
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры судовой автоматики и измерений
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: iapbgks@bk.ru

Аннотация

В 2015 году исполняется 100 лет, как Е.Т. Whittaker сформулировал впервые закономерность, которая позже вошла в историю науки, как теорема отсчетов Уиттекера-Котельникова-Шеннона (УКШ). И до настоящего времени эта закономерность играет весьма большую роль.

Дискретизация сигналов и процессов практически любой природы во времени в сочетании с их квантованием по уровню лежит в основе их цифровой обработки. Несоблюдение условий теоремы УКШ сопровождается либо неадекватным преобразованием данных, либо необоснованным введением информационной избыточности, что весьма критично.

В статье приведен краткий обзор многочисленных исследований, различных вариантов обобщения теоремы отсчетов и её приложений. Выполнена спектральная интерпретация физических процессов выборки сигналов при их дискретизации и показана природа формирования информационной избыточности при дискретном представлении непрерывных сигналов.

Впервые приведено обобщенное выражение для выбора граничных и оптимального значений частоты дискретизации реального полосового сигнала с учетом крутизны наклона высокочастотного и низкочастотного срезов, наклона огибающей спектральной плотности сигнала в полосе пропускания, а также допустимой погрешности преобразования по обоим его срезам.

Приведены методика, алгоритм и ряд примеров оптимизации частоты дискретизации сигналов с различными вариантами представления формы спектра.

Ключевые слова: Теорема отсчетов, погрешности преобразования, информационная избыточность, реальный полосовой процесс, спектральная плотность, наклон спектра, интерференционные погрешности, обобщенное условие дискретизации, приложения теоремы отсчетов

100 YEARS OF THE SAMPLING THEOREM: RESEARCH, SYNTHESIS AND APPLICATION

Alekseev Anatoly Vladimirovich
the professor, Dr.Sci.Tech.
the professor of MARINE AUTOMATION AND MEASUREMENT,
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
tel: +7 (812) 455-23-63 e-mail: iapbgks@bk.ru

Abstract

2015 will mark 100 years since E. T. Whittaker formulated the first pattern, which later went down in history of science, as the sampling theorem Whittaker-Kotel'nikov-Shannon (the CODE). And to date this pattern plays a very important role.

Discretization of signals and processes of almost any nature in time in combination with the quantization level is the Foundation of their digital processing. Failure to comply with the conditions of the theorem of the CODE or accompanied by inadequate conversion of data or neobone-EN-introduction of information redundancy, which is very critical.

The article presents a brief review of numerous studies, various variants of generalization of the sampling theorem and its applications. Performed spectral interpretation of the physical process of sampling signals at their discretization and shows the nature of formation of information redundancy in the discrete representation of continuous signals.

The generalized expression to select the boundary and the optimal values of the sampling frequency of the real bandpass signal with regard to the steepness of the slope visocica-frequency and low-

frequency sections, the slope of the envelope of the spectral density of the signal in the bandwidth and permissible error of conversion on both of its sections.

The method, algorithm and several examples of optimization of the sampling frequency of the signals with various embodiments of the submission of the form spectrum.

Key words: Sampling Theorem, error of conversion, information redundancy, real bandpass process, spectral density, the slope of the spectrum, interface-reconnue error, a generalized condition of discretization, application of the sampling theorem.

Введение

В 2015 году исполняется 100 лет, как Е.Т. Whittaker сформулировал впервые закономерность [1], которая позже вошла в историю науки, как теорема отсчетов Уиттекера-Котельникова-Шеннона (УКШ). И до настоящего времени эта закономерность играет весьма большую роль в математике, физике, технике, оптике, кристаллографии, других областях.

Дискретизация сигналов и процессов практически любой природы во времени в сочетании с их квантованием по уровню лежит в основе их цифровой обработки. Несоблюдение условий теоремы УКШ является крайне критичным и сопровождается либо неадекватным преобразованием данных с соответствующими погрешностями и ошибками, либо необоснованным введением информационной избыточности с соответствующим завышением требований по составу средств, их качеству и ресурсным затратам.

Оптимизация выбора частоты дискретизации исходных процессов и сигналов позволяет обеспечить компромиссные условия между этими противоречивыми факторами, что и является одной из ключевых задач на пути аналого-цифрового преобразования данных и их последующей обработки. Специфика преобразования и обработки информации, как и особенности преобразовываемых исходных процессов и сигналов, должны непосредственно учитываться при дискретизации. Но именно это и определяет сложность проблемы выбора её параметров.

Поэтому многие годы от первой формулировки условий и требований к выбору значения частоты отсчетов в 1915 г. Е.Т. Whittaker [1], в 1927 г. W.L. Ferrar [2], в 1928 Н. Nyquist [3], в 1929 г. J.M. Whittaker [4], в 1933 Котельниковым В.А. [5], в 1946 D.Gabor и в 1949 К. Шенноном очень многие авторы всесторонне исследовали эту проблему. Делали и продолжают делать попытки обобщения этого базового параметра цифрового преобразования информации – частоты выборки отсчетов, частоты дискретизации процесса.

В последнее время приоритет Е.Т. Whittaker (математика Эдмунда Уиттекера) в части формулирования теоремы отсчетов [1], датированной 1915 годом, также был подвергнут некоторому сомнению. Утверждают, что интерполяционная формула [1], как её обычно называют, восходит к работе Эмиля Бореля, датированной 1898 годом. Интерполяционная формула была процитирована из работы сына Эдмунда Уиттекера — Джона Макнейтена Уиттекера [4], датированной 1929 годом, в виде теоремы отсчетов Найквиста — Шен-

нона в 1949 году [3, 6]. Автором редакции был Клод Шеннон.

Но до Шеннона данную закономерность сформулировал в закрытой работе В.А. Котельников еще в 1933 г. [5]. Причем, в форме семи теорем, а в пятой теореме был рассмотрен наиболее общий вариант представления функции, имеющей ненулевую нижнюю частоту. Случай дискретизации сигналов - не по верхней граничной частоте спектра, а по его полосе частот.

В систематизированном виде и хронологическом порядке наиболее значимые, по нашему мнению, ссылки из [1-34] приведены в таблице 1.

Сразу следует отметить, что представить полный ряд авторов в этой области вряд ли возможно, так как за прошедший 100-летний первый период развития теоремы и теории отсчетов этот ряд представляется весьма и весьма обширным. В то время, как в первую очередь, конечно, представляет интерес именно история развития самой теоремы отсчетов. Именно условия выбора частоты дискретизации в обобщенном виде.

Так, сегодня наиболее обстоятельным аналитическим обзором исследований в области теории дискретного представления непрерывных (финитных) сигналов, безусловно, следует считать статью А Дж. Джерри [22].

Написанная к 30-летию введения Шенноном теоремы отсчетов в теорию связи эта аналитическая статья содержит 248 ссылок на наиболее значимые работы в этой исключительно «популярной» теме. Среди, в первую очередь и исторически, математиков, а также специалистов в области электротехники, связи, и практически всех других направлений информатики, эта предствительная работа и сегодня остается наиболее значимой среди обзорных по теореме УКШ.

В предлагаемой статье в контексте аналитического обзора ранее выполненных исследований на основе спектральной интерпретации физических процессов выборки сигналов при их дискретизации, анализа природы формирования сигнальной и информационной избыточности впервые представлено малоизвестное обобщенное выражение теоремы отсчетов для реальных полосовых сигналов с конечной (неидеальной) крутизной наклона спектра вне его рабочей полосы.

Сам термин «дискретизация» происходит от латинского *discretio* — «различать», «распознавать» и означает: преобразование непрерывной функции в дискретную. Указанное обобщенное условие выбора частоты дискретизации позволяет выбирать граничные и её оптимальное значение для непрерывных реальных полосовых процессов. При этом учитываются параметры описа-

ния их спектральной плотности по высокочастотному и низкочастотному срезам, по наклону огибающей спектра в основной полосе частот, по значению динамического диапазона, а также по допустимой погрешности их преобразования, по порядку (моду) дискретного преобразования и другим, имеющим важное практическое значение.

Данная статья в последней своей части обобщает результаты начатых с [24] многолетних исследований и посвящена памяти моего первого учителя в науке и неперенного соавтора ряда исследований Юлиана Ивановича Шавельского.

1. Теорема отсчетов

Уиттекера-Котельникова-Шеннона

В современном варианте оригинальная формулировка теоремы отсчетов УКШ, как правило, представляется следующим образом [22].

Теорема отсчетов УКШ: Если функция $f(t)$ не содержит частот выше W Гц, то она полностью определяется своими мгновенными значениями в моменты, отстоящие друг от друга на $1/2W$ сек.

По мнению А. Дж. Джерри, схема доказательства К. Шеннона [5] и метод записи $f(t)$ в форме ряда дискретных отсчетов

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f\left(\frac{n}{2W}\right) \frac{\sin \pi(2Wt - n)}{\pi(2Wt - n)} \quad (1)$$

аналогична описанному в работе [4] Дж. М. Уиттекера. По существу К. Шеннон ввел впервые, по мнению Джерри, физический смысл понятий времени и частоты в теорему отсчетов, в которой ряд (1) представляет собой кардинальный ряд Эдмунда Уиттекера [1].

Последовавшие позже многочисленные варианты доказательства ставшей позже широко известной теоремы отсчетов Уиттекера представляют собой небольшие отличия от приведенной формулировки Шеннона. Как правило, они различаются сочетаниями используемых формул Фурье-анализа, контурного интегрирования и матричного исчисления, но ключевое условие выбора интервала квантования сигнала во времени остается, что естественно, неизменным

$$T_d \leq 1/2W. \quad (2)$$

Так как пары преобразования Фурье симметричны, теорема отсчетов справедлива и для функций, финитных во времени, т.е. для функций $f(t)$, преобразования Фурье $F(\omega)$ которых обращаются в нуль при $|t| > T$, имеет место следующее важное условие

$$F(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F\left(\frac{n\pi}{T}\right) \frac{\sin \pi(T\omega - n\pi)}{(T\omega - n\pi)} \quad (3)$$

и соответственно для частотной области

$$F_d \geq 2W. \quad (4)$$

Сразу следует подчеркнуть ту важную особенность, что в зависимостях (1) - (4) предполагалось ограничение полосы частот сигнала только по верхнему (высокочастотному) срезу, а именно равенство нулю нижней частоты среза $F_H = 0$. И, более того, предусматривалось полное отсутствие в спектре частот сигнала составляющих выше верхней частоты среза сигнала $F_B = W$.

Как будет показано ниже, дальнейшая «интрига» теоремы отсчетов УКШ была связана с необходимостью учета именно этих двух основных факторов при обеспечении управляемого по допустимой погрешности преобразования и соответствующего обобщенного представления условия выбора частоты дискретизации.

В свою очередь, нельзя не отметить необыкновенно широкое внимание большого числа исследователей к проблеме малоизбыточного дискретного преобразования информации, обобщенного представления теоремы УКШ.

В этой связи в таблице 1 в структурированном и систематизированном виде представлена схема развития основных подходов в решении проблемы выборки данных и её модельного обоснования, влияния на избыточность данных и путей её минимизации.

При этом автор не мог и не преследовал цель всецело графически представить этот сложный и для науки сравнительно длительный 100-летний этап развития теоремы отсчетов. Тем не менее, нельзя не признать подобную систематизацию весьма полезной для данного направления развития науки, тем более, на юбилейном рубеже.

2. Информационная избыточность дискретного преобразования данных

Избыточностью в современных технических (ТС) и эрготехнических системах называется наличие в них возможностей по соответствующему критерию, превышающих необходимые для обеспечения её нормального функционирования, т.е. с заданными показателями достижения цели (своего целевого предназначения) [15: с. 234].

Обычно избыточность в ТС (ИТС) вводится для повышения устойчивости функционирования с учетом возможности изменения условий применения ТС, отличающихся от среднестатистических данных, используемых для задания уровня функциональной эффективности (качества ТС).

Таблица 1

**Основные этапы становления и развития исследований
в области теории отсчетов и её приложений**

Год, автор	Основной результат исследования	Особенности
1915, E.T. Whittaker [1]	О функциях, которые используются в расширении теории интерполирования	Впервые сформулирована зависимость
1927, W.L. Ferrar [2]	О содержании кардинальной функции интерполяции	Ввел понятие кардинальных функций
1928, H. Nyquist [3]	Некоторые зависимости в телеграфной теории передачи	Введено понятие частоты Найквиста
1928, Хартли Р.В.Л.	Теория информации и её приложения	Прикладные аспекты
1929, J.M. Whittaker [4]	Теория Фурье кардинальных функций	Обобщение рядов
1933, В.А. Котельников [5]	О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи. 9 теорем дискретизации	Теорема 5 для полосовых сигналов
1946, Gabor D.	Теория связи и основные приложения	Интерпретация
1949 (1963), Шеннон К. [6]	Связь при наличии шума. Обобщенное доказательство теоремы отсчетов для задач связи	Теорема введена в теорию связи
1949, I. Someya [7]	Приложение к теории передачи сигналов	Приложения УКШ
1953, A. Kohlenberg [8]	Точная интерполяция группа-ограниченные функции. Дискретизация p -го порядка	Разложение в ряд полосовых сигналов
1956, D.L. Jagerman, L.Fogel [9]	Некоторые общие аспекты теоремы отсчетов	Интерполяционное обобщение УКШ
1956, J.L. Yen [10]	Неравномерная дискретизация ограниченных по полосе частот сигналов	Неравностоящие дискретные отсчеты
1958, Турбович И.Т. [11]	Теорема отсчетов при неограниченном спектре	Обобщенный ряд
1957, Голдман С.	Теория информации и основные приложения	Интерпретация УКШ
1957, Weiss [12]лю.	Теорема выборки для задач и систем Штурма-Лиувилля	Обобщение теоремы отсчетов Вайсса-Крамера (УКШК)
1959, Н.Р. Kramer [13]	Обобщенная теорема выборки для интегрального преобразования Ганкеля (Бесселя)	
1959, Billings A.R. [14]	Дискретизация сигналов полосой частот, имеющей нижнюю частоту, не равную нулю	Графическая интерпретация УКШ
1959, Цыбаков Б.С., Яковлев В.П. [15]	О точности восстановления функций с помощью конечного числа членов ряда Котельникова	Анализ ошибок дискретизации
1960, Игнатьев Н.К. [16]	Общие методы исследования дискретизации	Обобщение методов
1061, F.M. Reza [17]	Введение в теорию информации	Многомерная теорема
1961, Мидлтон Д.	Введение в статистическую теорию связи	Интерпретация УКШ
1962, A. Papoulis [18]	Интеграл Фурье и его приложения	Учет реального фильтра обработки сигнала
1971, Стейн С., Джонс Д.	Принципы современной теории связи и их применение к передаче дискретных сообщений	Прикладные аспекты реализации УКШ
1972, Гаарднер Н.О. [20]	О многомерной теореме отсчетов	Обобщение теорем
1974, Кэтермоул К.В.	Принципы импульсно-кодовой модуляции	Приложение УКШ
1975, Стратонович Р.Л.	Современная теория информации	Интерпретация УКШ
1976, Бабенко В.И. [21]	Предварительная фильтрация при анализе спектра полосовых сигналов.	Учет погрешностей преобразования
1977, А. Дж. Джерри [22]	Теорема отсчетов Шеннона, её различные обобщения и приложения. Обзор	Обзор вклада различных исследователей
1977, Хургин Я. И., Яковлев В. П. [23]	Анализ трудов по теории финитных функций и ее применения в физике и технике	Аналитический обзор и интерпретация УКШ
1979, Шавельский Ю.И., Алексеев А.В. [24]	Способ дискретизации реальных полосовых непрерывных процессов (УКШр)	Обобщение теоремы для реальных сигналов
2004, Басараб М. А., Зелкин Е.Г., Кравченко ВФ.[32].	Цифровая обработка сигналов на основе теоремы УКШ	Аналитический обзор трудов по УКШ

В общем случае нормирование ИТС достигается в процессе исследовательского проектирования путем поиска компромиссных технических решений, обеспечивающих минимизацию обобщенных затрат для реализации требуемого уровня функциональной эффективности ТС и их устойчивости функционирования.

Частными видами ИТС являются: функциональная; информационная; алгоритмическая; аппаратная; техническая (временная, энергетическая и т.п.); ресурсная и другие. Как правило, представляется весьма сложным строго разделить избыточность по соответствующим видам вследствие сильной их причинно-следственной связи. В этой связи следует отметить то важное обстоятельство, что специалисты, ученые этой проблеме непрерывно уделяют внимание [34] и целый ряд решений по оптимизации ИТС известны и имеют большое практическое значение.

Информационная избыточность с её определяющим фактором – избыточностью отсчетов при аналого-цифровом преобразовании данных, особенно, в условиях интенсивного развития информационных технологий сегодня не только не утратила своего значения, но и приобретает особое значение по целому ряду причин:

- непрерывного наращивания требований по производительности систем обработки, как по потоку входных данных, так и по усложнению задач и алгоритмов преобразования данных, традиционно опережающих реальные возможности существующих систем обработки информации;
- необходимости оптимизации архитектуры и алгоритмов преобразования информации, в том числе с учетом погрешностей различных видов;
- неполноты знаний в реальных условиях о специфике обрабатываемых сигналов и наличия модельных ограничений при их обработке и др.

В общем случае информационная избыточность ТС (ИТСи) может быть представлена в виде следующего базового определения [15: с. 234]

$$\Delta = \delta - 1 = \frac{I}{I_{Min}} - 1, \quad (5)$$

где δ – индекс (коэффициент) избыточности по количеству фактической информации I во всех каналах обработки данных по отношению к его минимально необходимому значению I_{Min} для достижения заданного уровня функциональной эффективности (качества ТС) Q .

Поскольку частота дискретного представления сигналов, как носителей информации, F_D непосредственно связана с объемом информации I , в предположении идентичности каналов квантования сигналов по уровню имеет место следующее соотношение для информационной избыточности

$$\Delta = \frac{F_D}{F_{D_Min}} - 1 \approx \delta_D - 1, \quad (6)$$

где индекс избыточности по количеству информации практически совпадает с индексом избыточности по частоте дискретизации $\delta \approx \delta_D$.

Соотношение (5), с одной стороны, непосредственно демонстрирует совершенно особую значимость обоснованного выбора $F_D \rightarrow F_{D_Min}$, при котором имеет место оптимизация ИТСи и переход к безизбыточной эрготехнической системе с $\Delta \rightarrow 0$ и, соответственно, безизбыточными функционалом, структурой, комплексным алгоритмом и визуализацией данных, представляемым пользователю.

С другой стороны, соотношение (5) отражает принципиальную необходимость обоснованного решения системных вопросов оптимизации ТС в целом на основе взаимно согласованных частных, групповых и комплексных технических решений, что и обеспечивает минимизацию ИТС.

Согласования решений и их непротиворечивости с позиций верификации, естественно, включая критерии $\delta_D \rightarrow 1$ и $\Delta \rightarrow 0$. А также с

позиций оценки валидности принятых проектных организационно-технических и управленческих решений в ТС. Т.е. особо важного значения при этом концептуальной и системной оптимизации проектных и управленческих решений, включая обоснованную их малоизбыточность и, в пределе, безизбыточность.

Среди основных приложений теоремы УКШ в контексте минимизации информационной избыточности, прежде всего, могут быть названы сегодня такие области знаний и практики, как прикладная теория информации, связь, телевидение, акустика, гидроакустика, океанография, оптика, кристаллография, метеорология и многие другие.

В каждой из названных областей при неизбежной специфике соответствующих информационных преобразований проблема обоснования информационной избыточности и непосредственно дискретного преобразования процессов ключевой проблемой остается минимизация объема выборки данных в соответствии с теоремой УКШ. При непременном контроле и управлении допустимыми погрешностями дискретизации и, безусловно, их взаимосвязи и влияния на качество решения основных функциональных задач.

Тем самым, можно сделать естественный и очень важный вывод: необоснованное введение и завышение избыточности дискретного представления данных вопреки рекомендациям теоремы УКШ проявляется в необоснованном увеличении ресурсных затрат ТС, как на уровне информационно-технических преобразований, так и непосредственно на уровне системных и организационных процессов. Это, естественно, снижает конкурентную способность и возможности гармоничного и прогрессивного развития ТС в целом.

Следует подчеркнуть то обстоятельство, что многообразие подходов к формулированию и интерпретации теоремы УКШ, особенно, на рубеже 60-80 годов XX века резко возросло в связи с развитием цифровых технологий обработки сигналов и особого влияния на её требуемую производительность параметров дискретного преобразования сигналов. Именно на этом этапе к вопросам физической интерпретации дискретизации и квантования сигналов, спектральной трактовке выбора параметров преобразования стало привлекаться все большее внимание, что было вполне естественно для начала эпохи цифровой обработки информации.

3. Спектральная интерпретация процессов дискретизации неполосовых сигналов

Прежде всего, следует с учетом фундаментального характера представленного Уиттекером кардинального ряда (1) рассмотреть развитие его физической интерпретации.

Одним из ключевых вопросов дискретного представления сигналов является учет спектра сигнала (спектральной плотности сигнала) за пределами граничных частот полосы пропускания и образующихся при этом погрешностей наложения определенных участков спектров.

Так, для неполосового сигнала, т.е. при нижней граничной частоте сигнала $F_H = 0$, спектр дискретизированного с частотой F_D сигнала может быть представлен в следующем виде

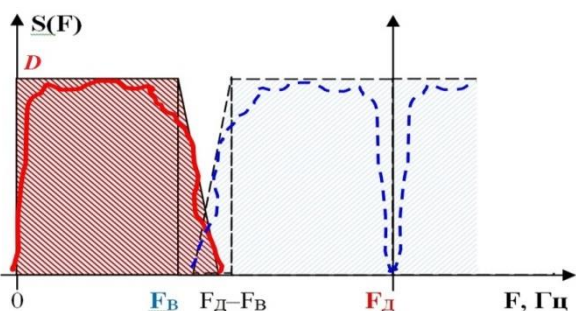


Рис. 1. Спектральная интерпретация процесса дискретного преобразования неполосового сигнала

Он представляет собой совокупность собственно спектра сигнала в полосе частот $0...F_B$ (выделено красной штриховкой) и инверсированного (обращенного) спектра, симметричного относительно частоты дискретизации F_D (выделенного пунктиром и штриховкой синего цвета).

В случае идеально ограниченных спектров (идеального по срезу частот сигнала вне основной полосы частот) имеет место следующий вариант (рис. 2) размещения прямого и инверсированных спектров сигнала. Прямые составляющие спектра выделены розовым цветом, обращенные – синим.

На это обстоятельство всегда обращалось особое внимание, т.к. именно перекрывающиеся участки спектров приводят к образованию так называемых интерференционных погрешностей преобразования (также называемых погрешностями наложения спектров, погрешностями алайсинга) и соответствующей необходимости увеличивать частоту выборки сигнала F_D .

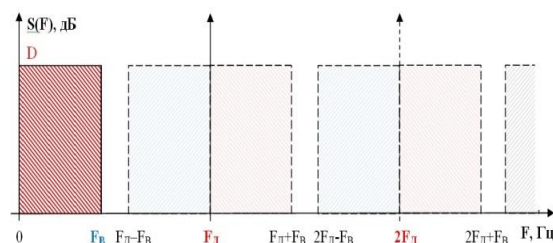


Рис. 2. Спектральная интерпретация процесса дискретного преобразования идеального сигнала

В соответствии с рис. 3, на котором представлен спектр дискретизированного реального (с реальным (неидеальным) срезом полосы частот) сигнала, область частот образования интерференционных погрешностей дискретного преобразования сигнала в основной полосе частот сигнала $0...F_B$ выделена белым цветом.

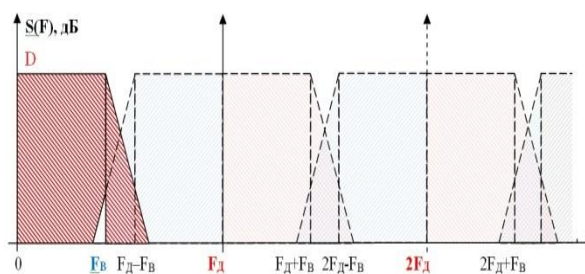


Рис. 3. Спектральная интерпретация процесса дискретного преобразования реального сигнала

Именно на величину этой погрешности (площадь белого треугольника) влияют выбранное соотношение частот F_B и F_D , а также величина наклона сплошной части спектра за пределами полосы пропускания $0...F_B$ и величина динамического диапазона сигнала в полосе рабочих частот D . Именно для такой модели дискретного преобразования сигналов в [25] была предложена аналитическая модель кусочно-линейной аппроксимации модуля спектральной плотности сигнала вида

$$|S(F)|^2 = \begin{cases} D^2, & \text{если } |F| \leq F_B \\ D^2 (F_B/F)^{2r}, & \text{если } |F| \geq F_B \end{cases}, \quad (7)$$

где r - порядок аппроксимирующей функции спектральной плотности сигнала в дБ/октаву, как

правило, совпадающий с порядком аппроксимирующей функции амплитудно-частотной характеристики фильтра предварительной селекции.

Используя теорему Парсеваля для мощности интерференционной погрешности P_{II} в основном спектре частот сигнала $0 \leq F \leq F_B$ в работе получено аналитическое выражение для величины относительной максимальной средней квадратической интерференционной погрешности

$$\varepsilon = \sqrt{P_{II}/P_C}, \quad (8)$$

где P_C - интегральное значение мощности основного спектра сигнала в основной полосе частот сигнала.

При этом, минимально допустимое значение частоты дискретизации должно удовлетворять следующему [24] условию, которое правомерно назвать обобщенной теоремой УКШ для реальных неполосовых сигналов

$$F_D \geq R \times F_B, \quad (9)$$

$$R = 1 + \left[\varepsilon^2 (2r - 1) + D \frac{1}{r^2} \right]^{\frac{-1}{(2r-1)}}, \quad (10)$$

где R - обобщенный параметр выбора частоты дискретизации по высокочастотному срезу (ВЧС) спектральной плотности сигнала.

В частном случае безошибочного дискретного преобразования реального неполосового сигнала имеет место условие

$$R = 1 + D^{1/r}, \quad \text{при } \varepsilon = 0. \quad (11)$$

Наконец, для условий идеально ограниченного по ВЧС сигнала, т.е. при $r \rightarrow \infty$ имеет место известное условие теоремы УКШ, при котором значение $R = 2$.

Другим полезным для практики малоизбыточного дискретного преобразования сигналов является условие, определяющее требования к фильтрам предварительной селекции по крутизне среза амплитудно-частотной характеристики вида

$$r \geq \frac{\lg D}{\lg(R-1)} = \frac{D_{дБ}}{20 \lg(R-1)}. \quad (12)$$

График зависимости (11) приведен на рис. 4 и может использоваться для обоснования выбора и оптимизации частоты дискретизации сигналов.

Приведенные выше данные позволяют осуществлять обоснованный выбор частоты дискретизации реального (непрерывного) неполосового сигнала. При этом учитываются его динамический диапазон, допустимая для конкретной задачи обработки сигналов величина интерференционной погрешности; параметры реальной амплитудно-частотной характеристики фильтра предварительной селекции.

В целом ряде случаев этот подход обеспечивает снижение требований, предъявляемых к цифровой системе обработки сигналов, по её производительности и объему памяти, т.е. позволяет повысить эффективность использования системы обработки в целом в сравнении с произвольным выбором соотношения между частотой сигнала.

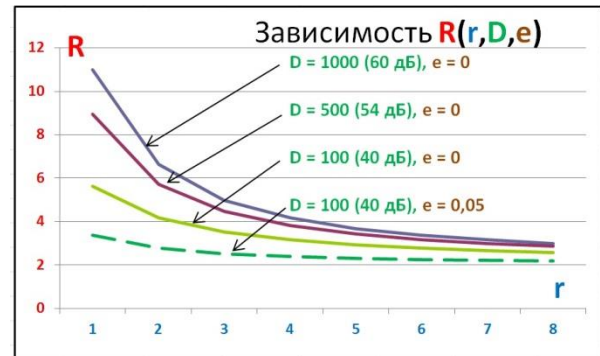


Рис. 4. График выбора обобщенного параметра частоты дискретизации для реальных неполосовых сигналов

С другой стороны, необоснованный выбор параметров дискретизации реальных неполосовых сигналов приводит неизбежно к образованию необратимых погрешностей преобразования, соответствующему снижению помехоустойчивости трактов обработки сигналов, снижению качества решения функциональных задач и т.п.

4. Учет формы спектра непрерывных сигналов при дискретном представлении

Другим источником минимизации избыточности при дискретном преобразовании сигналов может быть учет неравномерности спектра в полосе пропускания $0 \dots F_B$. Для широкого ряда практических задач, включая гидроакустические, сейсмоакустические, виброакустические, распространённой формой огибающей спектра неполосовых сигналов, является форма, приведенная на рис. 4 с соответствующими параметрами.

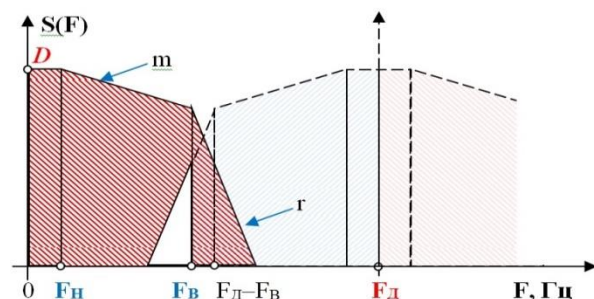


Рис. 4. Параметры учета формы спектра неполосового реального сигнала

В работе [26] для этих условий использована аналитическая модель в виде кусочно-линейной

аппроксимации участков спектра с соответствующими параметрам крутизны наклона огибающей спектральной плотности сигнала вида

$$|S(F)|^2 = \begin{cases} D^2, & F \leq F_H, \\ D^2 (F_H/F)^{2m}, & F_H \leq F \leq F_B, \\ D^2 (F_H/F)^{2m} (F_B/F)^{2r}, & F > F_B. \end{cases} \quad (13)$$

После аналогичных преобразований получено выражение для обобщенного выбора частоты дискретизации по ВЧС спектральной плотности сигнала вида

$$R = 1 + \left[\frac{\varepsilon^{2(2m+2r-1)}}{1-2m} + \frac{(F_H/F_B)^{\frac{m}{m+r}-2m}}{D^{2-1/(m+r)}} \right] \frac{-1}{(2m+2r-1)}. \quad (14)$$

В таблице 2 приведены варианты оценок обобщенного параметра R для условий: $\varepsilon = 0,05$, $r = 7$ (42дБ/октаву), $D = 100$ (40 дБ), $F_B / F_H = 4$ (2 октавы), а также другие значения параметров безизбыточного дискретного представления реальных неполосовых сигналов, включая выигрыш по величине частоты дискретизации при учете наклона сплошной части спектра сигнала (СЧС) в сравнении со случаем, когда параметр наклона $m = 0$ вида

$$\Delta = \frac{F_D(m > 0)}{F_D(m = 0)} \quad (15)$$

Табл. 2. Пример оценки параметров безизбыточного дискретного преобразования реальных неполосовых сигналов

m	R	Δ
3	2,04	1,13
2	2,20	1,05
1	2,24	1,03
0	2,30	1,00
-1	2,53	0,91
-2	2,82	0,82

Тем самым, как показывает анализ модели (15), выигрыш по частоте дискретизации тем больше, чем больше величина наклона ВЧС r и СЧС m , а также чем шире полоса ΔF и соответствующая относительная полоса частот сигнала

$$L = F_B / F_H = 1 + \Delta F / F_H. \quad (16)$$

Более того, при подъеме СЧС неполосового сигнала это приводит, наоборот, к необходимости дополнительного увеличения частоты F_D для обеспечения заданного значения интерференционной погрешности дискретизации.

Для современных трактов обработки сигналов с значениями крутизны срезов по ВЧС r более 60 дБ/октаву и величиной динамических диапазонов более 80 дБ вопрос корректного выбора параметров не перестает оставаться актуальным.

5. Обобщение теоремы отсчетов УКШ для реальных полосовых сигналов (УКШр)

Дискретное представление непрерывного входного сигнала, используемое при решении широкого класса задач передачи и обработки информации, сопровождается возникновением ряда специфических погрешностей, среди которых к числу основных с соответствующим ранжированием могут быть отнесены с учетом [18-22]:

- *интерференционные погрешности* (погрешности наложения спектров, погрешности алайсинга, погрешности мимикрии частот и т.п.), появляющиеся вследствие невыполнения условия о корректном выборе соотношения частоты выборки с параметрами сигнала, а также условия о финитности (непрерывности) спектра сигнала;
- *погрешности усечения*, возникающие при использовании конечного числа отсчетов вместо бесконечного ряда, необходимого для дискретного представления;
- *погрешность округления и амплитудная погрешность (погрешности квантования)*, обусловленная неточностью измерения амплитуды отсчетных значений, конечностью разрядности представления используемых чисел;
- *погрешность дрожания*, вызванная отличием моментов взятия отсчетов от точек отсчета;
- *погрешности недискретного представления сигналов*, обусловленные спецификой и погрешностями последующей обработки сигналов.

Минимизация погрешностей преобразования и обработки сигналов, данных, информации в целом сегодня, безусловно, должна рассматриваться в системно целостном процессе анализа, синтеза, оптимизации. И именно только такой подход может обеспечить обоснование проектного, управленческого решения и минимизацию риска заказчика при решении этой традиционной, но далеко не однозначной задачи.

После анализа основных факторов, влияющих на качество дискретного преобразования информации, перейдем к обобщению рекомендаций по обоснованному выбору, как уже было отмечено, параметра преобразования, а именно – частоты дискретного преобразования сигналов, обеспечивающих минимизацию и неперевышение допустимых погрешностей преобразования.

В современном варианте теорема отсчетов УКШ с учетом изложенных выше аспектов и в соответствии с результатами исследований [24-31] может быть представлена в виде **Обобщенной теоремы отсчетов для финитных функций с ограниченным по полосе частот спектром (УКШр)**, формулируемом впервые:

Теорема УКШр: Если спектральная плотность $S(F)$ функции времени $s(t)$ может быть представлена функцией вида

$$S(F) = D \left(\frac{F}{F_H} \right)^s \left(\frac{F_H}{F} \right)^m \left(\frac{F_B}{F} \right)^r, \quad (17)$$

где s, m, r – параметры формы спектра по крутизне наклона огибающей спектральной плотности функции $S(F)$ соответственно по низкочастотному срезу (НЧС) в диапазоне частот $[0; F_H]$, по сплошной части спектра (СЧС) в диапазоне частот $[F_H; F_B]$ с полосой частот ΔF , по высокочастотному срезу (ВЧС) в диапазоне частот $[F_B; \infty)$ функции $s(t)$, вне указанных диапазонов частот соответственно $s=0, m=0, r=0$, то при допустимой относительной погрешности наложения спектров (интерференционных погрешностей) по НЧС e_H , по ВЧС e_H , функция времени $s(t)$ полностью определяется своими мгновенными значениями в моменты времени, отстоящими друг от друга на $(1/F_D)$ секунд, а допустимое значение частоты дискретизации (частоты выборки) функции $s(t)$ должно выбираться из обобщенного условия вида:

$$F_D = \Gamma \times \Delta F, \quad (18)$$

где значение обобщенного параметра дискретизации (относительной частоты дискретизации) выбирается из граничного условия

$$\frac{(1+L)R}{1+k} \leq \Gamma \leq \frac{LS}{k}, \quad (19)$$

$k = 1; 2; 3, \dots; k_{max}$ - целочисленное значение, определяющее порядок (моду) дискретного представления функции времени $s(t)$;

$$L = \frac{F_H}{\Delta F} - \quad (20)$$

- относительное значение (местоположение) полосы частот ΔF , как правило, на уровне -3 дБ;

$S \in [0; 2], R \in [2; \infty)$ – обобщенные параметры учета ограниченной крутизны наклона огибающей спектральной плотности по НЧС и ВЧС с соответствующими диапазонами изменения значений и алгоритмами определения в зависимости от заданных значений погрешностей по НЧС e_H и по ВЧС e_H , относительной величины (динамического диапазона) D изменения значений функции $s(t)$, крутизны наклона спектральной плотности по НЧС s , по СЧС m и по ВЧС r .

Важными следствиями сформулированной теоремы УКШр являются следующие.

Следствие 1: Минимально избыточным значением частоты дискретизации является значение F_D при максимальном целочисленном значении порядка дискретного представления

$$k_{max} = INT\left\{1/\left[\left(1 + 1/L\right)\frac{R}{S} - 1\right]\right\}, \quad (21)$$

которое определяется только соотношением обобщенных параметров учета ограниченной крутизны наклона спектра по ВЧС и СЧС R/S , относительной полосой частот (местоположением полосы частот) L , а также оператором целочисленного значения в выражении (21) INT .

Причем, для идеально ограниченных спектров с $R = 2$ и $S = 2$ имеет место значение $R/S = 1$, при котором $k_{max} \rightarrow \infty$, а значение $\Gamma \rightarrow 2$.

Данный частный вид условия по теореме УКШр полностью совпадает с классическим случаем выбора частоты выборки для восстановления сигнала по теореме УКШ и УКШК при идеально ограниченном спектре сигнала [1, 3, 5, 6, 14].

Следствие 2: Для k - того порядка (моды) дискретного представления функции времени узлы (вершины клиньев) допустимых значений частот дискретизации имеют параметры

$$L_k = 1/\left[\left(1 + \frac{1}{k}\right)\frac{S}{R} - 1\right], \quad (22)$$

$$\Gamma_k = L_k S/k = (1 + L_k)R/(1 + k). \quad (23)$$

График множества областей допустимых значений относительной частоты дискретизации $\Gamma(L)$ для финитных функций с ограниченным по полосе частот спектром в соответствии с теоремой УКШр приведен на рис. 5.

Данный график представляет собой ограниченное множество (семейство) k областей клиновидной формы с вершинами, соответствующими координатам (22)-(23). Эти вершины областей характеризуют условия безизбыточного дискретного преобразования соответствующего k – того порядка (моды преобразования).

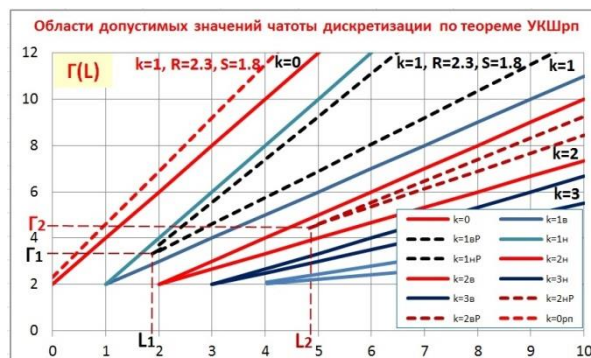


Рис. 5. Обобщенное условие выбора параметров дискретизации функции $s(t)$ по теореме УКШр

В том числе на графике $\Gamma(L)$ пунктиром приведены условия выбора F_d для реальных (с конечной крутизной наклона огибающей спектральной плотности) полосовых сигналов, для которых значения $R \neq 2$ и $S \neq 2$.

График наглядно показывает критичность влияния параметров дискретного преобразования на выбор допустимого значения частоты дискретизации, а также необходимое, но не достаточное условие выбора вида $F_d \geq 2\Delta F$.

Практически значение частоты дискретизации должно выбираться в условиях узкого диапазона значений (17) вблизи его середины. В этой связи полезными могут быть условия выбора среднеарифметического или среднегогеометрического значений обобщенного параметра в виде

$$\Gamma_k^A = \frac{(1+L)R}{2(1+k)} + \frac{LS}{2k}, \quad (24)$$

$$\Gamma_k^G = \left[\frac{(1+L)R LS}{4(1+k)k} \right]^{1/2}, \quad (25)$$

Следствие 3: Минимизация информационной избыточности дискретного представления функции времени $s(t)$ внутри области значений k – того порядка имеет место при условии

$$\Delta \approx \delta_d - 1 = \frac{\Gamma(k=0)}{\Gamma(k)} - 1 = \frac{(1+1/L)Rk}{S} - 1. \quad (26)$$

Анализ зависимости показывает, что минимизация информационной избыточности $\Delta \rightarrow 0$ достигается при наибольших значениях L , а также при минимизации значений $k \rightarrow 1$ и $R/S \rightarrow 1$.

В реальных условиях значение информационной избыточности может достигать весьма существенных значений и, прежде всего, за счет необоснованного и, даже, некорректного выбора частоты дискретизации, а также за счет ограниченных возможностей создания и использования высокоизбирательных систем предварительной селекции обрабатываемых сигналов со значениями $R \rightarrow 2, S \rightarrow 2$, что обеспечивается при $r, s \rightarrow \infty$. Рассмотрим несколько примеров практических оценок параметров дискретизации сигналов.

6. Количественные оценки

Например, при дискретизации сигнала в полосе частот с $F_H = 9,5$ кГц, $F_B = 10,5$ кГц при полосе частот $\Delta F = 1,0$ кГц одним из авторов предложено значение 2,048 кГц, «как ближайшая значение степени числа 2 к значению частоты 2,0 кГц».

Обоснуем по представленной теореме УКШр выбор частоты дискретизации следующим образом. Относительная полоса частот спектра сигнала в этом случае в соответствии с (18) составляет $L = 9,5/1,0 = 9,5$. По (19) при $R/S=1$ (условие

идеальной предварительной фильтрации) значение $k_{max} = 9$. Стало быть, диапазон значений по условию теоремы УКШр (17) составит: $\Gamma_9 \in [2,104...2,116]$. Причем, $\Gamma_0 \geq 21,04$.

Таким образом, предложенное значение частоты дискретизации 2,048 кГц (как близкое к значению степени 2) не входит в допустимый диапазон частот (2,104...2,116) кГц. Оно может быть использовано, но при условии корректировки границ полосы частот L , т.е. F_H или F_B .

Более того, если учесть реальные параметры предварительной фильтрации сигнала, например, при значениях на рис. 5 по НЧС $S = 1,85$, а по ВЧС $R = 2,30$ при равномерном спектре в полосе частот $m = 0$, то диапазон частот дискретизации существенно изменится, а именно: уменьшится существенно значение $k_{max} = 2$; $\Gamma_0 \geq 24,20$; $\Gamma_2 \in [8,066...8,807]$.

Графически взаимное расположение спектров дискретизированного сигнала для приведенного примера представлено на рис. 6 и наглядно иллюстрирует значения рассчитанных параметров.

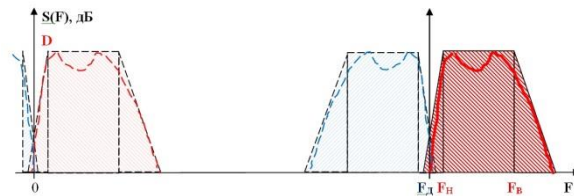


Рис. 6. Спектральная интерпретация процесса дискретного преобразования по примеру оценки

Если в соответствии с (22) в первом варианте удается сократить информационную избыточность дискретного представления сигнала до значения $\Delta_9 = 8,9$, то во втором случае всего лишь до значения $\Delta_2 = 1,7$. Это, тем не менее, тоже весьма существенно снижает требования к аппаратно-программным средствам обработки информации в целом. Однако, это может быть реализовано лишь при обязательном условии обоснованного выбора всего комплекса параметров дискретного представления в соответствии с условием (17) теоремы отсчетов УКШр.

Заключение

Несмотря на пройденный 100-летний рубеж освоения тайн дискретного преобразования временных функций и закономерностей их представления массивом выборочных значений, природа этих процессов продолжает привлекать внимание большого круга исследователей. Как математиков, среди которых Е.Т. Whittaker впервые сформулировал теорему отсчетов в виде кардинального ряда, так и технических физиков, связистов, теоретиков и практиков современной информатики и кибернетики, исследователей современных информационных технологий и многих других смежных дисциплин.

В результате проведенных исследований и формулирования закономерности дискретного представления информации в виде теоремы ВКШ

в практику цифровой обработки данных сегодня надежно вошли рекомендации, учет которых позволяет корректно переходить к ограниченным массивам данных и, тем самым, минимизировать информационную, функциональную, структурную, алгоритмическую и другие виды избыточности.

Сегодня, даже с учетом целого ряда ограничений, диктуемых особенностями практической реализации теоремы ВКШ, знание закономерностей дискретного преобразования данных позволяет использовать для полосовых сигналов в области МГц-частот и выше КГц-частоты дискретизации с соответствующим выигрышем в $k \geq 10 \dots 100$ раз и более. Безусловно, это имеет особое значение для объектов морской техники и морской инфраструктуры, где ведется традиционная борьба за каждый ресурсный показатель.

Наконец, даже в условиях освоения революционных возможностей современных информационных технологий с терабитными возможностями элементной базы вопросы информацион-

ной избыточности продолжают оставаться актуальными. И не только актуальными, но и критичными в связи комплексом новых ограничений по обработке информации, обусловленных принципиальным ограничением психофизиологических возможностей операторов по визуальной, интеллектуальной, групповой обработке данных, представляемых для принятия соответствующих проектных и управленческих решений.

В этих условиях именно максимизация ценности представляемых и обрабатываемых данных, включая удельную ценность на каждый бит данных, их системную значимость в интересах качества принятия решений предъявляет жесткие требования к методической корректности и повышенной точности выбора каждого из параметров обработки сигналов. Именно такую возможность предоставляет рассмотренный математический аппарат и методика обобщенного представления для реальных полосовых процессов теоремы отсчетов УКШр.

Литература

1. E.T. Whittaker, "On the function which are represented by the expansion of interpolating theory", Proc. Roy. Soc. Edinburgh, vol. 35, pp.181-194, 1915.
2. W.L. Ferrar, "On the consistency of cardinal function interpolation", Proc. Roy. Soc. Edinburgh, vol. 47, pp. 230-242, 1927.
3. H. Nyquist, "Certain topica in telegraph transmission theory", AIEE Trans., vjl. 47, pp. 617-644, 1928.
4. J.M. Whittaker, "The Fourier theory of the cardinal functions", Proc. Roy. Soc. Edinburgh, vol. 1, pp.169-176, 1929.
5. Котельников В.А. О пропускной способности «эффира» и проволоки в электросвязи. – В кн.: Материалы по радиосвязи к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции связ-зи. Всесоюзный энергетический комитет, 1933.
6. C. E. Shannon. Communication in the presence of noise. Proc. Institute of Radio Engineers. Vol. 37. No. 1. P. 10—21. Jan. 1949.
- Шеннон К. Связь при наличии шума. – В кн.: Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: ИЛ, 1963, с. 433-460.
7. I. Someya, Waveform Transmission.Tokyo: Shukyo, Ltd., 1949.
8. A. Kohlenberg, "Exact interpolation of band-limited functions", J. Appll. Physssiiics, vol. 24, pp. 1432-1436, 1953.
9. D.L. Jagerman and L.Fogel. "Some general aspects of the sampling theorem", IRE Trans. Inform. Theory, vol. IT-2, pp.139-146, Dec. 1956
10. J.L. Yen, "On the nonuniform sampling of band width limited signals", IRE Trans. Circult Theory, vol. CT-3, pp. 251-257, Dec. 1956.
11. Турбович И.Т. К вопросу о применении теоремы Котельникова к функции времени с неограниченным спектром. Радиотехника, 1958, т.13, № 8, с. 11-12.
12. Weiss, "Sampling theorems associated with Sturm-Liouville systems", Bull. Math. Soc., vol. 63, p. 242, 1957.
13. H.P. Kramer, "A generalized sampling theorem", J. Math. Phys., vol. 38, pp. 68-72, 1959.
14. Billings A.R. Sampling of Signals without D.C.Components. Electr.and Radio Engineer, v.36, 1959, № 26 p. 70-72.
15. Цыбаков Б.С., Яковлев В.П. О точности восстановления функций с помощью конечного чис-ла членов ряда Котельникова. Радиотехника и электроника, 1959, т. 4, № 3, с. 542.
16. Игнатъев Н.К. Общие методы исследования систем с дискретизацией. Электросвязь, 1960, т. 14, № 8, с. 3-11.
17. F.M. Reza, An Introduction to Information Theory. New York: McGraw-Hill, 1961.
18. A. Papoulis, The Fourier Integral and its Applications. New York: McGraw-Hill. 1962.
19. Папулис А. Анализ ошибок в теории выборок. ТИИЭР, 1966, т.54, № 7, с. 34-43.
20. Гаарднер Н.О. О многомерной теореме отсчетов. ТИИЭР, 1972, т.60, № 2, с. 119-121.
21. Бабенко В.И. Эффективность предварительной фильтрации при анализе спектра полосовых сигналов. Автометрия, 1976, № 5, с. 44-50.

22. А.Дж. Джерри. Теорема отсчетов Шеннона, её различные обобщения и приложения. ТИИЭР, т. 65, № 11, 1977 (с. 53-89).
23. Хургин Я. И., Яковлев В. П. Прогресс в Советском Союзе в области теории финитных функций и ее применений в физике и технике. — ТИИЭР, 1977, т. 65, № 7, с. 16—45.
24. Шавельский Ю.И., Алексеев А.В. Способ дискретизации непрерывных полосовых процессов. - Авторское свидетельство № 144574, 29.06.1979.
25. Шавельский Ю.И., Алексеев А.В., Халикова Н.М. Способ дискретизации полосовых непрерывных процессов. - Авторское свидетельство № 166323, 9.01.1981.
26. Алексеев А.В., Шавельский Ю.И. О выборе значения частоты дискретизации при дискретном представлении непрерывных процессов / Записки по гидрографии, 1981, вып. 205, с. 37-41.
27. Алексеев А.В., Шавельский Ю.И. Об учёте формы спектра непрерывного сигнала при его дискретном представлении / Записки по гидрографии, 1982, вып. 207, с. 31-33.
28. Разработка интерференционного метода сокращения информационной избыточности трактов обработки информации автономных гидроакустических станций: Л., 1983. 134 с.
29. Алексеев А.В., Шавельский Ю.И. Цифровой анализатор спектра. - Авторское свидетельство № 233277, 3.03.1985. 18 с.
30. Алексеев А.В., Шавельский Ю.И. Принципы построения субоптимального тракта согласованной спектральной обработки гидроакустических сигналов с квазипостоянно-процентной полосой анализа // Научно-технический сборник трудов, 1985, в.2 (6), с.39-45.
31. Гидроакустическая энциклопедия / Под ред. В.И. Тимошенко. – Таганрог: Издательство ТРТУ, 1999, с.235, 263, 614. Переиздано: 2000, с. 258, 289, 536.
32. Басараб М. А., Зелкин Е. Г., Кравченко В. Ф., Яковлев В. П. Цифровая обработка сигналов на основе теоремы Уиттекера-Котельникова-Шеннона. — М.: Радиотехника, 2004.
33. Спектры и анализ / А. А. Харкевич. — 4-е изд. — Москва: URSS : ЛКИ, 2007. — С. 89/
34. Материалы XII Международного симпозиума по проблеме избыточности в информационных системах.- СПб.: ГУАП, 2009.

References

1. E.T. Whittaker, "On the function which are represented by the expansion of interpolating theory", Proc. Roy. Soc. Edinburgh, vol. 35, pp.181-194, 1915.
2. W.L. Ferrar, "On the consistency of cardinal function interpolation", Proc. Roy. Soc. Edinburgh, vol. 47, pp. 230-242, 1927.
3. H. Nyquist, "Certain topica in telegraph transmission theory", AIEE Trans., vjl. 47, pp. 617-644, 1928.
4. J.M. Whittaker, "The Fourier theory of the cardinal functions", Proc. Roy. Soc. Edinburgh, vol. 1, pp.169-176, 1929.
5. Kotel'nikov V.A. O propusknoy sposobnosti «efira» i provoloki v elektrosvyazi. – V kn.: Ma-terialy po radi-osvyazi k I Vsesoyuznomu s"ezdu po voprosam tekhnicheskoy rekonstruktsii svya-zi. Vsesoyuznyy energeticheskiy komitet, 1933.
6. C. E. Shannon. Communication in the presence of noise. Proc. Institute of Radio Engineers. Vol. 37. No. 1. P. 10—21. Jan. 1949.
- Shannon K. Svyaz' pri nalichii shuma. – V kn.: Shennon K. Raboty po teorii informatsii i kibernetike. M.: IL, 1963, s. 433-460.
7. I. Someya, Waveform Transmission. Tokyo: Shukyo, Ltd., 1949.
8. A. Kohlenberg, "Exact interpolation of band-limited functions", J. Appll. Physssiiics, vol. 24, pp. 1432-1436, 1953.
9. D.L. Jagerman and L.Fogel. "Some general aspects of the sampling theorem", IRE Trans. Inform. Theo-ry, vol. IT-2, pp.139-146, Dec. 1956
10. J.L. Yen, "On the nonuniform sampling of band width limited signals", IRE Trans. Circult Theory, vol. CT-3, pp. 251-257, Dec. 1956.
11. Turbovich I.T. K voprosu o primenenii teoremy Kotel'nikova k funktsii vremeni s neograni-chennym spektrom. Radiotekhnika, 1958, t.13, № 8, s. 11-12.
12. Weiss, "Sampling theorems associated with Sturm-Liouville systems", Bull. Math. Soc., vol. 63, p. 242, 1957.
13. H.P. Kramer, "A generalized sampling theorem", J. Math. Phys., vol. 38, pp. 68-72, 1959.
14. Billings A.R. Sampling of Signals without D.C.Components. Electr.and Radio Engineer, v.36, 1959, № 2, s. 70-72.
15. Tsybakov B.S., Yakovlev V.P. O tochnosti vosstanovleniya funktsiy s pomoshch'yu konechnogo chis-la chlenov ryada Kotel'nikova. Radiotekhnika i elektronika, 1959, t. 4, № 3, s. 542.
16. Ignat'ev N.K. Obshchie metody issledovaniya sistem s diskretizatsiey. Elektrosvyaz', 1960, t. 14, № 8, s. 3-11.
17. F.M. Reza, An Introduction to Information Theory. New York: McGraw-Hill, 1961.
18. A. Papoulis, The Fourier Integral and its Applications. New York: McGraw-Hill. 1962.
19. Papulis A. Analiz oshibok v teorii vyborok. TIIEP, 1966, t.54, № 7, s. 34-43.

20. Gaardner N.O. O mnogomernoy teoreme otschetov. TIIEP, 1972, t.60, № 2, s. 119-121.
21. Babenko V.I. Effektivnost' predvaritel'noy fil'tratsii pri analize spektra polosovykh signalov. Avtometriya, 1976, № 5, s. 44-50.
22. A.Dzh. Dzherri. Teorema otschetov Shennona, ee razlichnye obobshcheniya i prilozheniya. TIIEP, t. 65, № 11, 1977 (s. 53-89).
23. Khurgin Ya. I., Yakovlev V. P. Progress v Sovetskom Soyuze v oblasti teorii finitnykh funktsiy i ee primeneniya v fizike i tekhnike. — TIIEP, 1977, t. 65, № 7, s. 16—45.
24. Shavel'skiy Yu.I., Alekseev A.V. Sposob diskretizatsii nepreryvnykh polosovykh protsessov. - Avtorskoe svidetel'stvo № 144574, 29.06.1979.
25. Shavel'skiy Yu.I., Alekseev A.V., Khalikova N.M. Sposob diskretizatsii polosovykh nepreryvnykh protsessov. – Avtorskoe svidetel'stvo № 166323, 9.01.1981.
26. Alekseev A.V., Shavel'skiy Yu.I. O vybere znacheniya chastoty diskretizatsii pri diskretnom predstavlenii nepreryvnykh protsessov / Zapiski po gidrografii, 1981, vyp. 205, c. 37-41.
27. Alekseev A.V., Shavel'skiy Yu.I. Ob uchete formy spektra nepreryvnogo signala pri ego dis-kretnom predstavlenii / Zapiski po gidrografii, 1982, vyp. 207, c. 31-33.
28. Razrabotka interferentsionnogo metoda sokrashcheniya informatsionnoy izbytochnosti traktov obrabotki informatsii avtonomnykh gidroakusticheskikh stantsiy: L., 1983. 134 s.
29. Alekseev A.V., Shavel'skiy Yu.I. Tsifrovoy analizator spektra. - Avtorskoe svidetel'stvo № 233277, 3.03.1985. 18 s.
30. Alekseev A.V., Shavel'skiy Yu.I. Printsipy postroyeniya suboptimal'nogo trakta soglasovan-noy spektral'noy obrabotki gidroakusticheskikh signalov s kvazipostoyanno-protseptnoy polosoy analiza // Nauchno-tekhnicheskii sbornik trudov, 1985, v.2 (6), s.39-45.
31. Gidroakusticheskaya entsiklopediya / Pod red. V.I. Timoshenko. – Taganrog: Izdatel'stvo TRTU, 1999, s.235, 263, 614. Pereizdano: 2000, s. 258, 289, 536.
32. Basarab M. A., Zelkin E. G., Kravchenko V. F., Yakovlev V. P. Tsifrovaya obrabotka signalov na osnove teoremy Uittekera-Kotel'nikova-Shennona. — M.: Radiotekhnika, 2004.
33. Spektry i analiz / A. A. Kharkevich. — 4-e izd. — Moskva: URSS : LKI, 2007. — S. 89/
34. Materialy XII Mezhdunarodnogo simpoziuma po probleme izbytochnosti v informatsionnykh sistemakh.- SPb.: GUAP, 2009.

УДК 338.242

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ СУДОСТРОЕНИЯ

Алехин Михаил Юрьевич

доктор экономических наук, профессор,
декан экономического факультета, профессор кафедры управления судостроительным производством
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: alekhin@smtu.ru

Волостных Вадим Викторович

доктор экономических наук,
профессор кафедры управления судостроительным производством
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: vadim.volostnykh@mail.ru

Аннотация

Цель исследования состоит в том, чтобы сформировать концептуальную характеристику системы стратегического управления судостроением, как необходимого условия обеспечения конкурентоспособности системы судостроения. Констатируя кризис системы стратегического управления развитием российского судостроения, авторы рекомендуют искать выход из него не в попытках реанимации утраченной плановой системы, а в ее регенерации на новых теоретико-методических основах, а также в новых организационных формах. Рекомендуется строить отраслевую (корпоративную) методологию управления на базе концепции динамических организационных способностей, а методологию уровня предприятия – на базе ресурсной концепции. Предлагается сформировать, альтернативный существующим структурам, экспертно-аналитический центр (ЭАЦ) по проблемам стратегического управления на базе СПбГМТУ. Формирование подобного центра делает возможным проведение исследований междисциплинарного характера. ЭАЦ может быть как главным независимым аналитиком научных программ, так и их интегратором.

Ключевые слова: Судостроение, система, стратегия, парадигмы стратегического управления, развитие, динамические организационные способности, организация экспертизы.

CHALLENGING PROBLEMS OF STRATEGIC MANAGEMENT IN SHIPBUILDING

Alekhin Michail Yurievich

the professor, Dr. Econ. Sci.

dean of economics department, the professor of SHIPBUILDING MANAGEMENT DEPARTMENT

STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: alekhin@smtu.ru

Volostnykh Vadim Viktorovich

the professor, Dr. Econ. Sci.

the professor of SHIPBUILDING MANAGEMENT DEPARTMENT,
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: vadim.volostnykh@mail.ru

Abstract

The goal of this research is to define the general concept of strategic management system in shipbuilding as the necessary condition of competitiveness in shipbuilding system. Since failure of several attempts to overcome the shipbuilding crisis by restoring the obsolete approaches the authors propose

a new course - to regenerate the strategic management system on different theoretical and methodological basis as well as in new organizational forms. It's recommended to form the industry (corporative) management philosophy on the dynamic organization competition paradigm and enterprise methodology on the resource concept. It's proposed to form the expert and analytical center on strategic management problems on the basis of SMTU that can be an alternative organization to existing structures. The development of such center makes it possible to carry out the multisubject researches. It can become the independent expert center of science programs as well as the integrator of them.

Key words: shipbuilding, system, strategy, paradigm of strategic management, development, dynamic organizational competition, expertise.

Введение

Постперестроечный период развития российского судостроения (1994-2012 гг.) характеризуются стабилизацией годового объема производства на уровне 160 тыс. компенсированных тонн (cgt), т.е. в 3,5 раза ниже 1990 г. Восемь подходов к проблеме обеспечения «неуклонного роста», а именно: приватизация, стратегия государственного программирования, инвестиции, реструктуризация, ренационализация, оптимизация активов, кластеризация не принесли ожидаемых результатов. Это свидетельствует о кризисе системы стратегического управления отраслью.

Научные исследования в области стратегического управления (как теоретического, так и прикладного характера) в отрасли после 1985 г. не выполнялись, что имело серьезные негативные последствия.

Во-первых, прекратила свое существование старая система стратегического управления, сложившаяся в эпоху планового хозяйства, которая, несмотря на медленную деградацию в период 1970-1990 гг., более или менее удовлетворительно функционировала до перестройки, а замены ей в условиях рыночной экономики не сформировалось.

Во-вторых, этот период характеризуется беспрецедентным в истории науки темпом развития теории стратегического управления (ТСУ) за рубежом. За период с 1960 г. по настоящее время сменилось пять основных парадигм этой науки, что всякий раз сопровождалось достаточно радикальными преобразованиями реальных принципов и методов управления на многих иерархических уровнях.

В частности, без создания такой системы едва ли удастся достичь заявленной на **2013-2020** гг. цели – увеличения годового выпуска продукции судостроения до 380-400 cgt, т.е. в 2,37 раза. На пути к решению такой задачи предстоит:

- определить требования к системе стратегического управления;
- сформировать теоретическую и методическую базу совершенствования для каждого внутриотраслевого уровня.

1. Требования к системе стратегического управления

Требования определяются тем, что система должна выполнять классический набор функций, присущий любому субъекту управления – прогнозирование, целеполагание (таргетирование), планирование, учёт и корректировка. Качество управления полностью зависит от качества информации (её точности, достоверности, своевременности, устойчивости к случайным и преднамеренным искажениям и т.п.), качества моделей, описывающих объект, методов и алгоритмов используемых для управления.

Следовательно, необходим методический инструментарий, адекватный прогнозируемым институциональным условиям. Этот инструментарий и есть функциональная составляющая системы стратегического управления отрасли, которая призвана занять место утраченной. При этом речь не может идти о воссоздании системы, системы существовавшей до 1990 года, но о её регенерации на основе современных социально-экономических реалий. Среди наиболее значимых из них следует отметить:

- неоднородность отрасли как объекта управления, сочетание государственных, акционерных (с разной долей государственного участия), частных предприятий;
- различный уровень административных полномочий субъекта управления;
- взаимодействие с заказчиками на разных рынках – монополистическом (госзаказ), олигополистическом (транспортные суда), свободном;
- отсутствие централизованного управления ресурсами;
- неогерентность целей субъекта и объекта управления.

Следовательно, речь может идти о создании системы «мягкого понуждения» всех участников процесса к достижению государственных целей и решению отраслевых задач.

2. Парадигмы стратегического управления судостроением

В основе трансформации системы стратегического управления лежит выбор актуальной парадигмы. Этот выбор осложняется не столько быстрой сменой приоритетных парадигм (концепций) в мировой науке, но и одновременным, параллельным использованием таковых в управленческой практике к производственной системе консервативной по своей природе. Целесообразно вкратце рассмотреть сущность сменявших друг друга этапов развития ТСУ и попытаться представить характер предстоящего этапа (рис. 1.) [1].

На первом этапе (1960-1975 гг.) доминировала концепция приоритета планирования, отражающая взаимодействие фирмы с внешней средой, а источниками конкурентных преимуществ считались внутренние сильные и слабые стороны фирмы.

На втором этапе (1975-1990 гг.) упор делается на концепции рыночного позиционирования, считавшегося основным источником конкурентных преимуществ. На этих этапах формулируются широко применяемые аналитические методы SWOT и STEP analysis.

На третьем этапе (1990-2005 гг.) на доминирующей позиции утвердилась ресурсная концепция, уделяющая основное внимание внутренним ресурсам и способностям фирмы. Растёт значение нематериальных активов, в т.ч. интеллектуаль-

ных, организационных факторов устойчивых конкурентных преимуществ и ключевых компетенций.

На четвёртом этапе (2005 г. – настоящее время) возобладала парадигма динамических организационных способностей и механизмов их проактивного обновления. Развивается управление знаниями, сетевая и оболочечная организация производственных систем, способных мимикрировать (менять свои размеры [4]) в соответствии с существенным изменением внешних условий для обеспечения экономического выживания.

При различии акцентов и методического инструментария все перечисленные парадигмы и концепции объединены общими допущениями:

- объект исследования – отдельная, пусть сколь угодно большая фирма в конкурентной рыночной среде;
- предполагается неизменность феномена «устойчивого развития»;
- сохраняется возможность экстенсивного роста фирмы;
- степень внешнего регулирования рынка не растёт;
- природные ресурсы неограниченны.

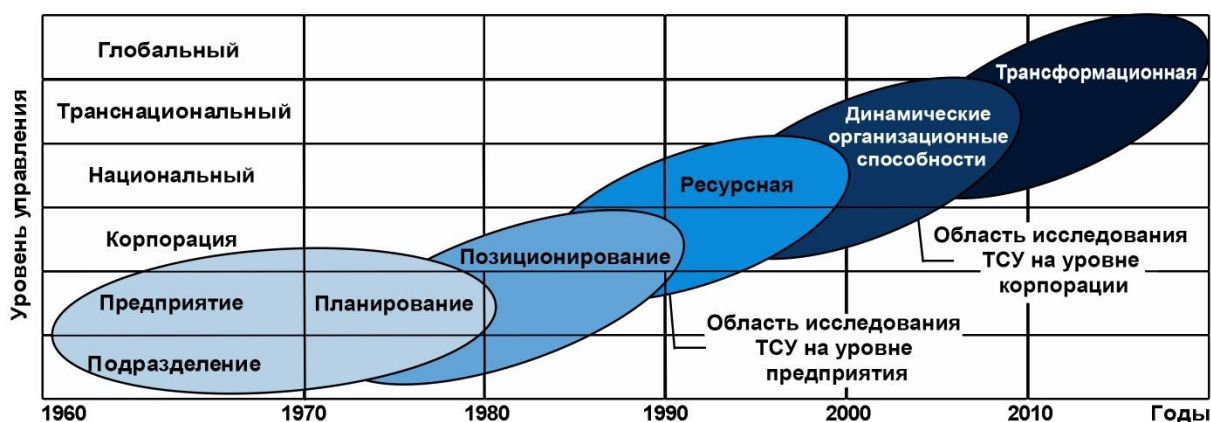


Рис. 1. Развитие парадигмы стратегического управления

К сожалению, срок действия перечисленных допущений (а также не затрагиваемых здесь) уже истекает, и в следующих периодах развития системам стратегического управления будут соответствовать иные постановки задач в рамках иных ограничений.

Наиболее очевидно:

- перемещение процесса принятия стратегических решений на глобальный уровень, и соответствующее сокращение полномочий и компетенций нижележащих уровней;
- ослабление, раздробление и постепенная ликвидация национальных государств;
- сокращение численности населения Земли, изменение его социальной и профессионально-квалификационной структуры;

- исчерпание природных ресурсов и радикальная перестройка мировой экономики;
- замена рыночного механизма той или иной формой планирования и контроля.

Поэтому предстоящий период развития СУ уместно назвать «трансформационным» и учитывать лишь как отдалённую перспективу. К счастью, в период, охватываемый настоящим исследованием, данным фактором можно пренебречь. Приближённый, оценочный анализ исследований позволяет определить наиболее перспективные области разработки ТСУ и используемые парадигмы:

- отраслевой (корпоративный) уровень – на основе парадигмы динамических организационных способностей;
- уровень фирмы – на основе ресурсной парадигмы.

3. Организационная форма исследований и разработок в области развития ТСУ в РФ

В отрасли не осуществляется серьезная и планомерная работа по развитию ТСУ, нет научных структур решающих задачу по созданию обоснованных методик управления с учетом специфики хозяйственной деятельности в судостроении.

Ни органы государственного управления (Минпромторг, Минобороны, Минэкономразвития, Минтранс и т.д.), ни ОСК, номинально должны стать таковыми субъектами, не заинтересованы в развитии теории стратегического управления на должной научной основе. В ведомственных интересах они предпочитают имитировать стратегическое управление таким образом, чтобы обеспечить себе свободу рук и бесконтрольность. Но даже при самых благих намерениях рассчитанные на длительную перспективу теоретические изыскания нельзя провести в кабинетах правительственных учреждений, сотрудники которых приспособили свое мышление к повседневному потребностям и решению «узких задач». Непреодолимые сложности возникают и при попытке переключить традиционные научные центры (в нашем случае – ФГУП «Крыловский государственный научный центр», ОАО «ЦТСС» и др.) на работу по тематике, от которой они целенаправленно уклонялись десятилетиями. Немало проблем возникает и в связи с преодолением ведомственных границ между организациями при комплектовании крупных исследовательских коллективов, при изучении проблем, затрагивающих различные научные дисциплины.

Плодотворным может быть только подход, практикуемый нашими западными партнерами – создание независимых «мозговых центров» типа давно ставшего эталоном RAND Corporation. В этой организации выработан эффективный подход к фундаментальному анализу и формулированию стратегии. В его основу положены четыре принципа [3]:

- разработка новой формулировки поставленного вопроса с тем, чтобы убедиться, не поставлен ли этот вопрос на неправомерных или устаревших положениях;
- отрешенность от частной задачи;
- прогнозируемые будущие события, в т.ч. отдаленные, должны быть существенным фактором исследования;
- тесный контакт с заказчиком в ходе разработки.

Исследование должно носить междисциплинарный характер, причем изменения состава экспертов должны быть весьма гибкими и динамичны-

ми. Наконец, такая организация может быть и главным научным экспертом чужих программ, и их интегратором.

В условиях судостроения такая организация может быть создана только в рамках СПбГМТУ. Поскольку субъект разработки ТСУ, основанной на вышеперечисленных принципах, может быть создан и обрести достаточный экспертный потенциал лишь в достаточно отдаленном будущем, следует вычленив научные проблемы, доступные для решения наличными силами. Первоочередными из них можно считать:

- выбор и описание объекта исследования;
- выбор парадигмы и уровня исследования;
- определение оптимального пакета индикаторов работы отрасли и выбор методов их расчёта.

Заключение

Можно утверждать:

1. Отраслевые структуры управления в судостроении не адекватно оценивают последствия игнорирования развития ТСУ. Поддержание системы СУ – есть необходимое, но недостаточное условие обеспечения конкурентоспособности отрасли судостроения.

2. По мнению авторов перед научным сообществом стоит задача восстановления научного потенциала по развитию теории управления для различных уровней деятельности **в судостроении, создания независимого экспертного сообщества, развития (т.е. создания) методологии** управления динамическими организационными способностями предприятий и т.п.. Именно в результате этой деятельности могут, **в частности**, начаться процессы по созданию кластеров судостроения.

Без развития теории СУ, отвечающей потребностям отрасли, невозможно внятно (обоснованно) определить направления развития производственных систем даже на среднесрочную перспективу.

Литература

1. Катъкало В.С. Теория стратегического управления; этапы развития и основные парадигмы. // Вестник СПбГУ. Сер. Менеджмент. 2002. №№ 2-3.
2. Dickson P. Think Tanks N.Y. Atheneum. 1971/2003.
3. Информационный сборник. Корпорация РЭНД, США, п/я 8096.
4. Pino G. Audia. Less Likely to Fail: Low Performance, Firm Size and Factory Expansion in the Shipbuilding Industry // Management Science, Vol. 52, №1, January 2006, pp. 83-94.

References

1. Kat'kalo V.S. (2002). Teoria strategicheskogo upravleniya; etapy razvitiya i osnovnye paradigmy [Theory of strategic management; stages of development and the main paradigm]. St.Peterburg, Vestnik SPbGU, 2-3.
2. Dickson P. Think Tanks N.Y. Atheneum. 1971/2003.
3. Information Collection. Rand Corporation, USA, postbox 8096.
4. Pino G. Audia. Less Likely to Fail: Low Performance, Firm Size and Factory Expansion in the Shipbuilding Industry // Management Science, Vol. 52, №1, January 2006, pp. 83-94.

Математическое моделирование

УДК 534.26

ДИФРАКЦИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ НА УПРУГИХ ТЕЛАХ СФЕРОИДАЛЬНОЙ ФОРМЫ, НАХОДЯЩИХСЯ В ПЛОСКОМ ВОЛНОВОДЕ

Клещёв Александр Александрович

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики Санкт-Петербургского государственного морского технического университета 190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3
тел. (812) 757-10-55 e-mail: alexalex-2@yandex.ru

Аннотация

В статье показана эффективность метода мнимых источников и рассеивателей для нахождения импульсов, рассеянных сфероидальным телом и, опираясь на использование групповой скорости звука, были вычислены первые отражённые, прошедшие и дифрагированные импульсы для упругой вытянутой сфероидальной оболочки и сплошного упругого сжатого сфероида, с помощью преобразования Фурье и метода мнимых источников и мнимых рассеивателей была решена задача дифракции импульсного сигнала и это решение опирается на использование в нём групповой (а не фазовой) скорости распространения импульса вдоль горизонтальной оси волновода, поскольку импульс представляет собой сгусток энергии, а энергия может распространяться в среде только с групповой скоростью, не превышающей скорости звука, т. е. метод нормальных мод, опирающийся на фазовую скорость распространения, в данном случае непригоден.

Ключевые слова дифракция, волновод, импульс, упругое сфероидальное тело, источник, рассеиватель, мнимый.

DIFFRACTION OF PULSE SOUND SIGNALS ON ELASTIC BODIES OF SPHEROIDAL FORM, PUT IN PLANE WAVEGUIDE

Kleshchev Alexander Alexander

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

Abstract

In the paper is shown the effectiveness of the method of the imaginary sources and imaginary scatterers for the pulse sequence, got from spheroidal body and based at the use of the group velocity of the sound, were calculated first reflected, transmitted and diffracted pulses for the elastic prolate shell and the solid elastic oblate body, with the help of the Fourier transform and of the method of the imaginary sources and imaginary scatterers is solved the problem of the scattering of the pulse sound signal by elastic bodies of spheroidal form, put in the plane waveguide. and this solution is based on the use it in the group (instead of phase) pulse propagation velocity along the horizontal axis of the waveguide, because pulse is bundle of energy and energy can propagate in the medium only with the group velocity not exceeding the velocity of the sound, that is the method of normal modes based on the phase velocity of the propagation, in the case is not applicable.

Keywords: *diffraction, waveguide, pulse, elastic spheroidal body, source, scatterer, imaginary.*

Введение

На основе метода мнимых источников и мнимых рассеивателей решается задача рассеяния импульсных сигналов на упругих телах сфероидальной формы, помещённых в плоский волно-

вод с идеальными границами. Импульсные сигналы являются сгустками энергии, поэтому они распространяются с групповой скоростью, этому требованию отвечает в принципе метод мнимых источников и мнимых рассеивателей (и, с другой

стороны, этому условию не соответствует метод нормальных волн волновода).

1. Метод мнимых источников и мнимых рассеивателей для упругих сфероидальных тел, помещённых в плоский волновод

Рассеяние звука телами, помещёнными в волновод, исследовалось в работах [1 – 5]. В статье [4] были вычислены спектральные характеристики звукового импульсного сигнала, рассеянного идеальным вытянутым сфероидом. В работе [2] на основе метода мнимых источников и мнимых рассеивателей были найдены вертикальные распределения рассеянного звукового поля идеально мягкого сфероида, расположенного в плоском волноводе и облучаемого гармоническим сигналом. В [6] с помощью преобразования Фурье и характеристик рассеяния гармонического звукового сигнала были вычислены импульсы, рассеянные идеальным вытянутым сфероидом.

Рассмотрим вытянутую сфероидальную оболочку, находящуюся в жидком слое толщины H с постоянной скоростью звука. На верхней границе волновода выполняется условие Дирихле, на нижней границе – условие Неймана. Ось вращения вытянутой сфероидальной оболочки ориентируем параллельно границам волновода (рис. 1). Будем полагать, что размеры рассеивателя, его удалённость от границ и толщина волновода H таковы, что можно пренебречь взаимодействием рассеивателя с границами волновода и в дальнейшем его не учитывать [7]. Центр рассеивателя зафиксирован и отстоит на расстоянии $z_1 = 0,5H$ от дна, на горизонтальном расстоянии R от него и на той же глубине помещён точечный источник Q импульсного сигнала. Будем рассматривать импульсные сигналы с гармоническим наполнением. На рис. 2 представлен рассеиватель в виде сплошного упругого сжатого сфероида, помещённого в плоский волновод.

- Спектр $S_0(2\pi\nu)$ звукового импульса источника $\Psi_i(t)$ с гармоническим наполнением имеет вид [8]:

$$S_0(2\pi\nu) = \frac{i\nu_0}{\pi(\nu_0^2 - \nu^2)} (-1)^n \sin(\pi n \frac{\nu}{\nu_0}), \quad (1)$$

где: ν_0 – частота заполнения импульса; n – число периодов колебаний гармонического сигнала в импульсе; ν – текущая циклическая частота.

- Спектр $S_0(2\pi\nu)$ связан с $\Psi_i(t)$ обратным преобразованием Фурье:

$$\Psi_i(t) = (\pi)^{-1} \operatorname{Re} \int_0^\infty S_0(2\pi\nu) \exp(+i2\pi\nu t) d(2\pi\nu)$$

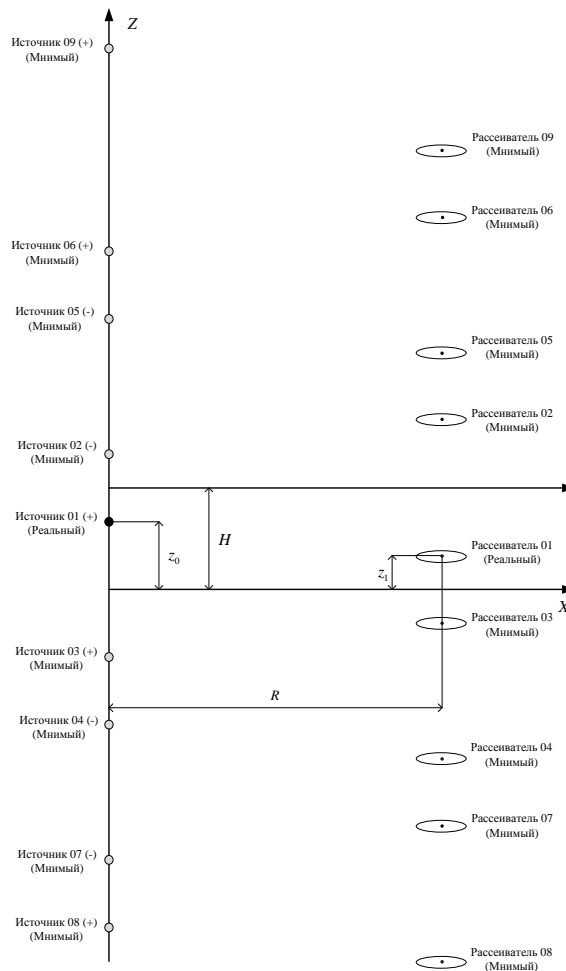


Рис. 1. Взаимное положение импульсных точечных источников и рассеивателей (вытянутых сфероидальных оболочек) в плоском волноводе.

Спектр рассеянного (отражённого или прошедшего) сигнала $S_s(2\pi\nu)$ является произведением спектра источника на угловую характеристику рассеяния сфероидальной оболочки $D(\eta, \varphi, \nu)$ (η и φ – угловые координаты точки наблюдения). Спектр дифрагированного сигнала $S_\Sigma(2\pi\nu)$ является суммой $S_0(2\pi\nu)$ спектров и $S_s(2\pi\nu)$. С помощью $S_s(2\pi\nu)$ и $S_\Sigma(2\pi\nu)$ могут быть записаны выражения для $\Psi_s(t')$ и $\Psi_\Sigma(t')$ [3]:

$$\Psi_s(t') = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \int_0^\infty S_s(2\pi\nu) e^{+i2\pi\nu t'} d(2\pi\nu) \quad (2)$$

$$\Psi_\Sigma(t') = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \int_0^\infty S_\Sigma(2\pi\nu) e^{+i2\pi\nu t'} d(2\pi\nu) \quad (3)$$

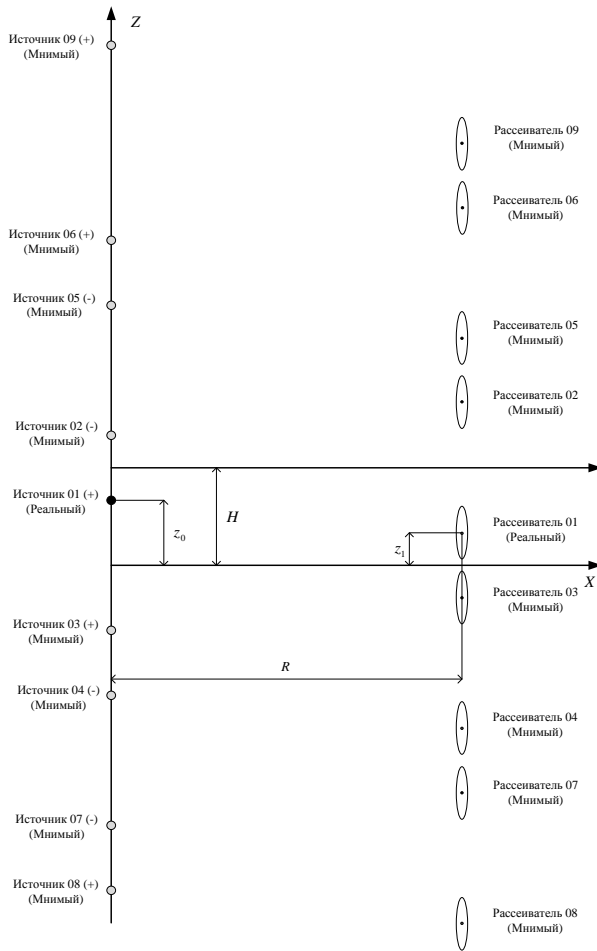


Рис. 2. Взаимное положение импульсных точечных источников и рассеивателей (сжатых сплошных сфероидов) в плоском волноводе.

Обратимся теперь к рассеивателю в форме упругой сфероидальной оболочки. Все потенциалы, включая потенциал падающей волны Φ_0 , потенциал рассеянной волны Φ_1 , потенциалы Дебая U и V , скалярный потенциал оболочки Φ_2 , потенциал газа, заполняющего оболочку Φ_3 , можно разложить в ряды по сфероидальным волновым функциям [3]. Значения коэффициентов разложения потенциала рассеянной волны находятся из физических граничных условий на обеих границах оболочки:

- 1) непрерывность нормальных компонент смещения на границах оболочки;
- 2) равенство нормального напряжения в оболочке звуковому давлению в жидкости и газе;

3) отсутствие тангенциальных напряжений на обеих границах оболочки.

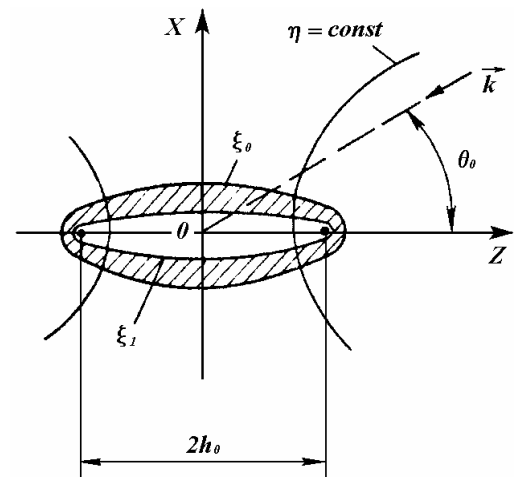


Рис. 3. Упругая вытянутая сфероидальная оболочка.

Нахождение коэффициентов разложения потенциала рассеянной волны с использованием граничных условий приводит к решению бесконечных подсистем уравнений с фиксированным индексом методом усечения.

Переход от вытянутых сфероидальных координат к сжатым осуществляется путём замены волнового размера C на iC и радиальной координаты ξ на $i\xi$.

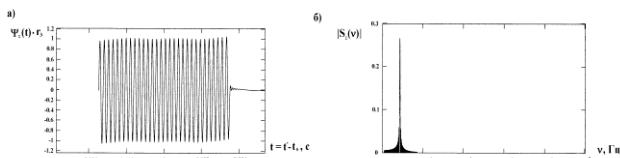
2. Результаты расчётов отражённых и дифрагированных импульсных сигналов

Угловая характеристика упругой сфероидальной оболочки вычисляется по формуле [3]:

$$D(\eta, \varphi, \nu) = (2 / ik) \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n \geq m}^{\infty} (-i)^n B_{m,n} \bar{S}_{m,n}(C, \eta) \cos m\varphi,$$

где: $C = kh_0$ – волновой размер; k – волновое число в жидкости; h_0 – полуфокусное расстояние; $B_{m,n}$ – неизвестный коэффициент разложения; $\bar{S}_{m,n}(C, \eta)$ – нормированная угловая сфероидальная функция.

На рис. 4 изображён падающий импульс $\Psi_i(t)$ (а) и нормированный модуль его спектра (б). Рис. 5 представляет первый отражённый нормализованный импульс $r_1 \Psi_s(t) / k$, где: k - масштаб-



ный коэффициент; r_1 и r - на рисунках расстояния от сфероидальной рассеивателя до точки наблюдения.

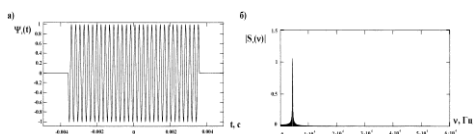


Рис. 4. Падающий импульс с гармоническим заполнением (а); нормированный модуль спектра падающего импульса (б).

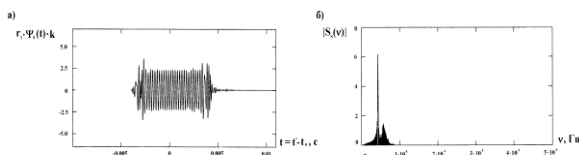
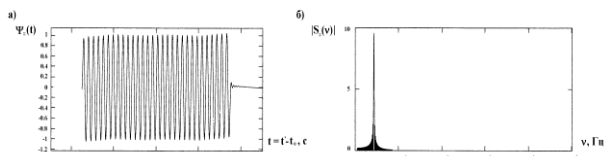


Рис. 5. Первый нормированный импульс, отражённый от вытянутой сфероидальной оболочки (а); нормализованный спектр отражённого импульса (б).

Первый отражённый импульс имеет максимальную групповую скорость вдоль оси X и потому зависит только от реальных источника и рассеивателя. Из рис. 6 виден дифрагированный импульс $\Psi_\Sigma(t)$ вытянутой сфероидальной оболочки (а) и нормированный модуль его спектра (б), так как точка наблюдения в этом случае находится в зоне Фраунгофера на оси X , то дифрагированный импульс полностью определяет-



ся падающим импульсом.

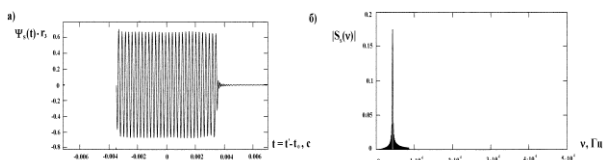


Рис. 6. Дифрагированный импульс вытянутой сфероидальной оболочки (а); нормированный модуль его спектра (б).

Рис. 7. Отражённый нормированный импульс от сплошного сжатого сфероида (а); нормированный модуль его спектра (б).

Рис. 7 характеризует первый импульс, отражённый от упругого сплошного сжатого сфероида (а) и нормированный модуль его спектра (б). Для этого же рассеивателя был вычислен с помощью быстрого преобразования Фурье дифрагированный импульс и модуль его спектра (см. рис. 8).

Рис. 8. Дифрагированный импульс для сплошного сжатого сфероида (а); нормированный модуль его спектра (б).

Заключение

В работе показана эффективность применения метода мнимых источников и мнимых рассеивателей для вычисления отражённых и дифрагированных импульсных сигналов применительно к упругой вытянутой газонаполненной сфероидальной оболочке и сплошному упругому сжатому сфероиду, находящимся в плоском волноводе.

Автор выражает благодарность А. С. Клименкову и Е. И. Кузнецовой за помощь в проведении расчётов.

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

Литература

1. Bostrom A. In col. Artic. Ed. by Varadan V. K., Varadan V. V., Acoustic, Electromagnetic and Elastic Wave Scattering – Focus on the Matrix Approach, Pergamon press, New-York. 1980. P. 211 – 224.
2. Гринблат Г. А., Клещев А. А. Рассеяние и излучение звука телами, помещёнными в плоский волновод. Техническая акустика, Т. 2. № 3. 1993. С. 3 – 5.
3. Клещев А. А. Гидроакустические рассеиватели. С. – Пб.: Прима. 2012. 268 с.
4. Клещев А. А., Ключин И. И. Спектральные характеристики рассеяния звука телом, помещённым в звуковой канал. Акустический журнал, Т. 20. № 3. 1974. С. 470 – 473.
5. Клещев А. А. Дифракция звукового пучка на упругой сферической оболочке, находящейся в плоском волноводе и взаимодействующей с границами. Тр. симп. Взаимодействие акустических волн с упругими телами. Таллинн, ТГУ. 1989. С. 103 – 106.
6. Kleshchev A. A., Kuznetsova E. I. Diffraction of Impulse Sound Signals on Spheroidal Body, Put in Plane Waveguide, J.T.M.P. V. 2. № 6. 2012. P. 211 – 214.
7. Kleshchev A. A., Kuznetsova E. I. Interaction of Acoustic Scatterers, Acoust. Phys., V. 57. № 4. 2011. P. 308 – 311.
8. Харкевич А. А. Спектры и анализ. М.: ГИТТЛ, 1957. 236 с.

References

1. Bostrom A. In col. Artic. Ed. by Varadan V. K., Varadan V. V., Acoustic, Electromagnetic and Elastic Wave Scattering – Focus on the Matrix Approach, Pergamon press, New-York, 1980. P. 211 – 224.
2. Grinblat G. A., Kleshchev A. A.. The scattering and the emission of the sound by the bodies, placed in the waveguide, J. Techn. Acoust., V. 2. № 3. 1993. С. 3 – 6.
1. Kleshchev A. A. Hydroacoustic Scatterers. St. Petersburg: Prima, St.- Petersburg. 2012. 268 p.
2. Kleshchev A. A., Klukin I. I. (1974). The spectral characteristics of the scattering of the sound by the body, placed in the sound channel, Sov. Phys. Acoust. V. 20. № 3. P. 470 – 473.
3. A. A. Kleshchev. The diffraction of the sound beam at the elastic spheroidal shell, placed in the plane waveguide and interacting with the boundaries, Proc. Symp. Interact of Acoust. Waves with Elast. Bodies, Tallinn, TGU 1989, P. 103 – 106..
4. Kleshchev A. A., Kuznetsova E. I. Diffraction of Impulse Sound Signals on Spheroidal Body, Put in Plane Waveguide, I.J.T.M.Ph. V. 2. № 6. 2012. P. 211 – 214.
5. Kleshchev A. A., Kuznetsova E. I. Interaction of Acoustic Scatterers, Acoust. Phys., V. 57. № 4. 2011. P. 505 – 510.
6. Kharcevich A. A. Spektrum and Analysis. Moskow: GITTL, 1957. 236 p.

УДК 534.23

ИМПЕДАНС ПЛОСКОЙ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ГАЗ-ЖИДКОСТЬ С УЧЕТОМ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ В АКУСТИЧЕСКОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Легуша Федор Федорович

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры физики СПбГМТУ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
190008 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д. 3

Мусакаев Махмуд Абдурашидович

кандидат физико-математических наук,
ст. преподаватель
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
190008 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д. 3
e-mail: maogan@mail.ru tel: (812) 757-10-55

Попков Сергей Владимирович

Доктор технических наук, снс,
Начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
196158 г. Санкт-Петербург, Московское шоссе д. 44

Чижов Георгий Витальевич

инженер
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
190008 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д. 3

Аннотация

В статье рассматривается влияние диссипации энергии в акустическом пограничном слое (АПС) на входной импеданс поверхности, с которой взаимодействует плоская звуковая волна. В рассматриваемом случае реализуется следующий механизм поглощения звука. Звуковая волна, взаимодействующая с поверхностью жидкого полупространства, возбуждает на ней неоднородные вязкие и тепловые волны. Эти волны сильно затухают и могут существовать в газе только за счет энергии отбираемой у звуковой волны. Следствием этого является уменьшение величины модуля входного импеданса поверхности жидкости Z_{BI} . Импеданс Z_{BI} и его фазовый угол становятся зависящими от частоты волны.

Получено выражение для расчета параметров входного импеданса Z_{BI} поверхности жидкого полупространства, с которым взаимодействует плоская звуковая волна, распространяющаяся в газе. Это выражение может быть также рекомендовано для расчета входного импеданса плоской поверхности границы газ – резиноподобное тело. Для примера рассчитаны параметры Z_{BI} для случая взаимодействия звуковой волны с границей воздух – вода. Формулу для расчета Z_{BI} рекомендуется применять на частотах лежащих ниже 20,0 кГц. На высоких частотах ($f > 50,0$ кГц) выражение для Z_{BI} трансформируется в формулу входного импеданса абсолютно твердой теплопроводной поверхности.

Ключевые слова: Звуковая волна, граница полупространств, нормальный импеданс, входной импеданс, газ, жидкость, акустический пограничный слой, диссипация энергии.

IMPEDANCE PLANE BOUNDARY GAS-LIQUID INTERFACE WITH TAKING INTO ACCOUNT ENERGY DISSIPATION IN THE ACOUSTIC BOUNDARY LAYER

Legusha Fedor Fedorovich

the professor, Dr.Sci.Phys.-Math.
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF ST. PETERSBURG
3, Lotsmanskaya Str., St.Petersburg, 190008 Russia

Musakaev Makhmud Abdurashidovich

Cand. Sci.Phys.-Math.

STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF ST. PETERSBURG
3, Lotsmanskaya Str., St.Petersburg, 190008 Russia
e-mail: maogan@mail.ru tel: (812) 757-10-55

Popkov Sergey Vladimirovich

Dr.Sci.Tec.

Head of laboratory, FSUE "Krylovskiy state scientific center"
196158 St. Petersburg, Moskovskoe shosse 44

Chizhov Georgiy Vitalevich

the engineer

STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF ST. PETERSBURG
3, Lotsmanskaya Str., St.Petersburg, 190008 Russia

Abstract

This article examines the impact of energy dissipation in the acoustic boundary layer (ABL) on the input impedance of the surface, which interacts with a plane sound wave. In this case, implements the following mechanism of sound absorption. Sound wave interacts with surface of liquid half-space on which it creates inhomogeneous viscous and heat waves. These waves are strongly damped, and may only exist in the gas due to the energy withdrawn from the sound wave. Result of this process is decrease of input impedance of the liquid surface Z_{BI} . As a result impedance Z_{BI} and its phase angle depends from wave frequency.

We have got an the expression which calculates the input impedance of the surface of a liquid half-space interacts with the flat sound wave propagating in a gas. Also this expression can be recommended to calculate the input impedance of the flat surface boundary of gas-rubbery body. For the example we have made calculation of Z_{BI} parameters for the case of sound wave interaction with boundary of air-water. This expression can be used for the frequencies until 20.0 Hz. When frequencies volume are bigger than 50.0 kHz this expression transforms to formula which calculates impedance of heat-conducting solid surface.

Key words The sound wave, the boundary of the half-spaces, the normal impedance, input impedance, gas, liquid, acoustic boundary layer, the energy dissipation.

Введение

В работе [1] представлено решение классической задачи о взаимодействии плоской гармонической волны с границей раздела жидких полупространств. При этом показано, что параметры отраженной и преломленной волн полностью определяются нормальным импедансом поверхности, с которой взаимодействует звуковая волна.

Применение методики, разработанной Б.П. Константиновым [2,3], позволило Ф.Ф. Легуше [4-7] произвести расчеты параметров акустического поля, возникающего при взаимодействии плоской звуковой волны с границей раздела жидких полупространств с учетом поглощения энергии в акустическом пограничном слое (АПС) границы. При этом были получены формулы для расчетов коэффициента отражения, коэффициента прохождения, коэффициента поглощения и нормального импеданса границы. Результаты работ [4-7] несколько позже были уточнены в статье [8].

Отличительной особенностью границы газ-жидкость является наличие резкого скачка нормального импеданса на поверхности раздела. В работах [4 - 8] показано, что вблизи поверхности раздела неоднородные вязкие и тепловые волны,

из которых формируется АПС, возбуждаются только в акустически мягкой среде. Аналогичная ситуация наблюдается при формировании АПС вблизи твердой абсолютно теплопроводной поверхности [2,3]. По этой причине на высоких частотах поверхность любой жидкости поглощает акустическую энергию аналогично поверхности абсолютно твердого теплопроводного тела.

1.Постановка задачи

Рассмотрим следующую задачу. Пусть гармоническая звуковая волна p_1 , имеющая плоский бесконечный фронт, падает на поверхность, разделяющую два жидких полупространства (рис. 1). Эта поверхность является гладкой и бесконечной. Первое полупространство заполнено газом или паром умеренной плотности. Второе полупространство является жидкой средой. Среды, заполняющие оба полупространства, могут иметь произвольные наборы физических параметров.

В классическом случае [1] входной импеданс системы рассчитывается при помощи формулы

$$Z_2 = \rho_2 c_2 / \cos \theta_2, \quad (1)$$

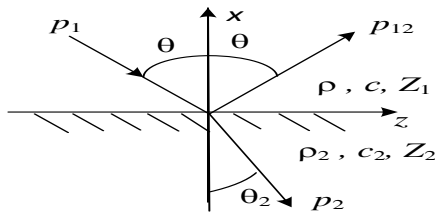


Рис. 1 Схема взаимодействия гармонической звуковой волны с плоской границей жидких полупространств ρ_1, ρ_{12} и ρ_2 – соответственно падающая, отраженная и преломленная звуковые волны

В классическом случае [1] входной импеданс системы рассчитывается при помощи формулы $Z_2 = \rho_2 c_2 / \cos \theta_2$, (1)

где ρ_2, c_2 – плотность и скорость звука во второй среде; θ_2 – угол преломления звуковой волны; $\cos \theta_2 = \sqrt{1 - (c_2 \sin \theta / c)^2}$, где θ – угол падения волны; c – скорость звука в 1 среде.

Решение этой задачи известно и по этой причине на нем мы останавливаться не будем. Отметим только то, что оно получено без учета диссипации акустической энергии в АПС. Рассматриваем наиболее важный с практической точки зрения случай, когда на границе раздела полупространств выполняется условие $c < c_2$. На границе наблюдается явление полного внутреннего отражения волны. При углах падения волны $\theta \geq \theta_{кр} = \arcsin(c/c_2)$,

в формуле (1) $\cos \theta_2$ заменяется выражением

$$\cos \theta'_2 = -i \sqrt{(c_2 \sin \theta / c)^2 - 1}.$$

При таких условиях величина входного импеданса границы Z_2 для фиксированных значений угла θ (см. выражение (1)) не зависит от частоты. На угловой зависимости $|Z_2(\theta)|$ имеется особая точка. При $\theta \rightarrow \theta_{кр}$ величина $|Z_2(\theta)| \rightarrow \infty$. При углах $\theta < \theta_{кр}$ импеданс $Z_2(\theta)$ является чисто вещественной величиной. При углах $\theta \geq \theta_{кр}$ импеданс $Z_2(\theta)$ – чисто мнимая, отрицательная величина. Фазовый угол импеданса $\varphi = 0$ при $\theta < \theta_{кр}$ и $\varphi = -\pi/2$ при $\theta \geq \theta_{кр}$.

2. Импеданс Б.П. Константинова

Если предположить, что второе полупространство (см. рис. 1) является абсолютно твердым, абсолютно теплопроводным телом, то мы получим условие задачи, которую решил Б.П. Константинов [2,3]. Согласно решению этой задачи при взаимодействии звуковой волны с поверхностью на ней возбуждаются неоднородные вязкие и тепловые волны, формирующие АПС. Вязкие и тепловые волны распространяются в среде, заполняющей первое полупространство. Эти волны сильно затухают и могут существовать только за счет энергии, отбираемой у звуковой

волны. Таким образом, в АПС реализуется механизм диссипации акустической энергии.

Выражение для входного импеданса бесконечно жесткой и абсолютно теплопроводной плоской поверхности с учетом поглощения звука в АПС получено Б.П. Константиновым [2]

$$Z_K = \frac{(1-i)\rho c}{2m \cos \theta}, \quad (2)$$

$$m = (b_{11} + b_{21} \sin^2 \theta) / \cos \theta,$$

где

$$b_{11} = (\gamma - 1) \sqrt{\omega a / 2c^2}, \quad b_{21} = \sqrt{\omega \nu / 2c^2},$$

$\omega = 2\pi f$ – частота волны, $\gamma = C_P / C_V$ – постоянная адиабаты или коэффициент Пуассона, C_P и C_V – удельные теплоемкости среды при постоянном давлении и объеме, $\nu = \eta / \rho$ – кинематическая вязкость, $a = \chi / C_P \rho$ – температуропроводность, η – динамическая вязкость, χ – теплопроводность газа.

Обратимся к импедансу твердой абсолютно теплопроводной поверхности. Из формулы (2) видно, что величина импеданса определяется только параметрами первой (газообразной) среды. Реальная и мнимая компоненты импеданса Z_K имеют одинаковую величину. Знак минус, стоящий перед $Im Z_K$ указывает на то, что импеданс Z_K характеризует упругие свойства поверхности. При фиксированном угле падения θ величина модуля импеданса $|Z_K|$ с ростом частоты убывает пропорционально $1/\sqrt{f}$. Фазовый угол нормального импеданса Z_K не зависит от частоты и угла падения волны $\varphi = -\pi/2$.

Частотные зависимости модуля импеданса (2) для границы раздела воздух – твердое абсолютно теплопроводное тело показаны на рис. 2. Здесь и далее везде расчеты проводим для случая, когда первое полупространство заполнено воздухом ($P_0 = 1,0$ атм, $T_0 = 293$ К). Кривые, показанные на рис. 2, получены для фиксированных значений угла падения волны: $1 - \theta = 0$; $2 - \theta = \pi/2$.

Из рис. 2 нетрудно заметить, что с ростом частоты модуль импеданса $|Z_K(f)|$ монотонно убывает. Это обусловлено увеличением диссипации энергии в АПС (см. формулу (2)). При углах падения θ близких к нулю диссипация энергии в АПС обеспечивается за счет затухания тепловых волн. Это и определяет ход кривой 1. По мере увеличения угла падения θ в диссипативный процесс вмешиваются вязкие волны. При $\theta = \pi/2$ амплитуда вязкой волны становится максимальной и, как это видно из хода кривой 2, значения $|Z_K(f)|$ становятся минимальными.

В классической акустике [1] входной импеданс поверхности твердого тела $Z_2 = \infty$. Формирование вблизи поверхности тела АПС делает модуль входного импеданса (2) достаточно большой, но

конечной величиной. Это хорошо видно из данных, представленных на рис. 2.

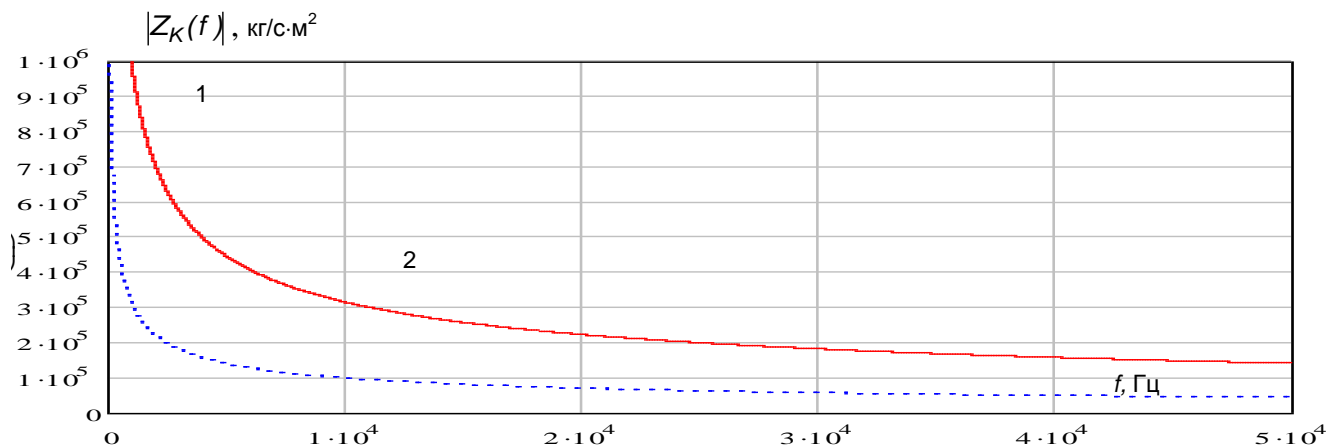


Рис. 2 Частотные зависимости модуля импеданса границы воздух-твердое абсолютно теплопроводное тело; 1 – при $\theta = 0$; 2 – при $\theta = \pi/2$

3. Импеданс границы газ-жидкость с учетом поглощения звука в АПС

Покажем, что формула (2) может быть использована для оценки влияния диссипативных процессов, происходящих в АПС, на параметры акустического поля в случае, когда второе полупространство имеет конечные значения физических параметров. Для этого воспользуемся электроакустическими аналогиями и представим систему, показанную на рис. 1, в виде эквивалентной схемы (рис. 3-а).

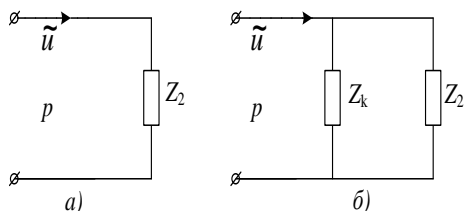


Рис. 3 Эквивалентные электрические схемы раздела жидких полупространств: а – без учета АПС, б – с учетом поглощения звука в АПС

Если второе полупространство является жестким телом, то в этой схеме $Z_2 = \infty$. Цепь оказывается разомкнутой и, как следствие этого, потерь в ней нет. В этой цепи потери в АПС могут быть учтены за счет введения импеданса (2). Единственный вариант, при котором модуль входного импеданса цепи Z_{Bl} , будет конечной величиной, это зашунтировать Z_2 импедансом Z_K (рис. 3-б). Проводимость цепи, показанной на рис. 3-б, определяется уравнением

$$\frac{1}{Z_{Bl}} = \frac{1}{Z_K} + \frac{1}{Z_2},$$

из которого после несложных преобразований получим формулу для расчета входного импеданса поверхности

$$Z_{Bl} = \frac{Z_K Z_2}{Z_K + Z_2}. \quad (3)$$

Анализ работ [4-8], посвященных расчетам коэффициентов отражения и прохождения звуковых волн, взаимодействующих с бесконечной границей жидких полупространств, с учетом поглощения звука в АПС показывает, что в случае, когда выполняется неравенство

$$\rho c \ll \rho_2 c_2 \quad (4)$$

вязкие и тепловые волны возбуждаются только в акустически мягкой среде. В рассматриваемом случае это первое полупространство, заполненное газом.

Следовательно, процесс формирования АПС вблизи реальной границы, на которой выполняется условие (4), не отличается от процесса формирования АПС вблизи абсолютно жесткой поверхности. На этом основании можно утверждать, что формально полученное выражение (3) можно применять для расчета коэффициентов отражения и прохождения, звуковых от границы раздела сред, имеющих реальные физические параметры. При этом поглощение звука в АПС будет учитываться автоматически.

3. Анализ выражения для расчета входного импеданса поверхности жидкого полупространства

Проведем численный анализ выражения (3), применительно к границе раздела газ-жидкость. Будем полагать, что первое полупространство (см. рис. 1) заполнено воздухом, а второе водой. Граница раздела характеризуется параметрами: $\rho c = 415 \text{ кг/с·м}^2$; $\rho_2 c_2 = 1,49 \cdot 10^6 \text{ кг/с·м}^2$;

$$\theta_{кр} = 0,231 = 13,2^\circ.$$

Частотные зависимости модулей входного импеданса поверхности жидкости полупространства $|Z_{BI}(f)|$, рассчитанное с учетом диссипации энергии в АПС, показаны на рис. 4. Расчеты ведем с использованием формулы (3) для фиксированных углов падения: $\theta = 0$, кривая – 1; $\theta = \theta_{кр}$, кривая – 2; $\theta = \pi/2$, кривая – 3.

Из рис. 4 видим, что с ростом частоты волны величина $|Z_{BI}(f)|$ монотонно уменьшается. Это

обусловлено возрастанием поглощения звука в АПС. Во всех случаях $|Z_{BI}(f)| < Z_2(0) = \rho_2 c_2$.

Следовательно, процесс диссипации энергии в АПС приводит как бы к дополнительному “размягчению” поверхности жидкого полупространства. Этот эффект наиболее сильно проявляется при угле падения волны $\theta = \pi/2$, когда фронт плоской звуковой волны скользит вдоль поверхности жидкого полупространства.

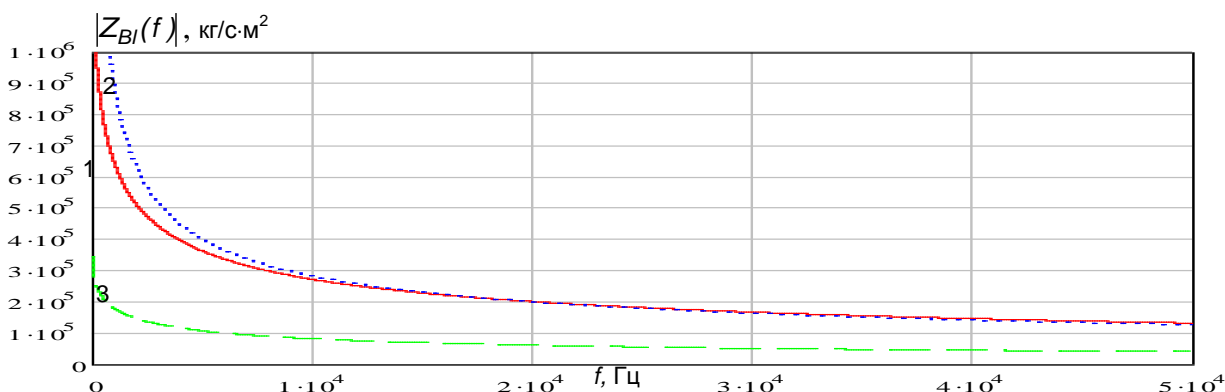


Рис 4. Зависимость величины модуля входного импеданса от частоты при фиксированных углах падения: 1 – $\theta = 0$; 2 – $\theta = \theta_{кр}$; 3 – $\theta = \pi/2$

На рис. 5 представлены результаты расчетов угловых зависимостей модуля входного импеданса $|Z_K(\theta)|$ (формула (2), кривые 1, 3, 5) и входного импеданса жидкой поверхности $|Z_{BI}(\theta)|$ (фор-

мула (3), кривые 2, 4, 6). Расчеты сделаны на фиксированных частотах: 5,0 кГц, кривые – 1, 2; 10,0 кГц, кривые – 3, 4; 50,0 кГц, кривые – 5, 6.

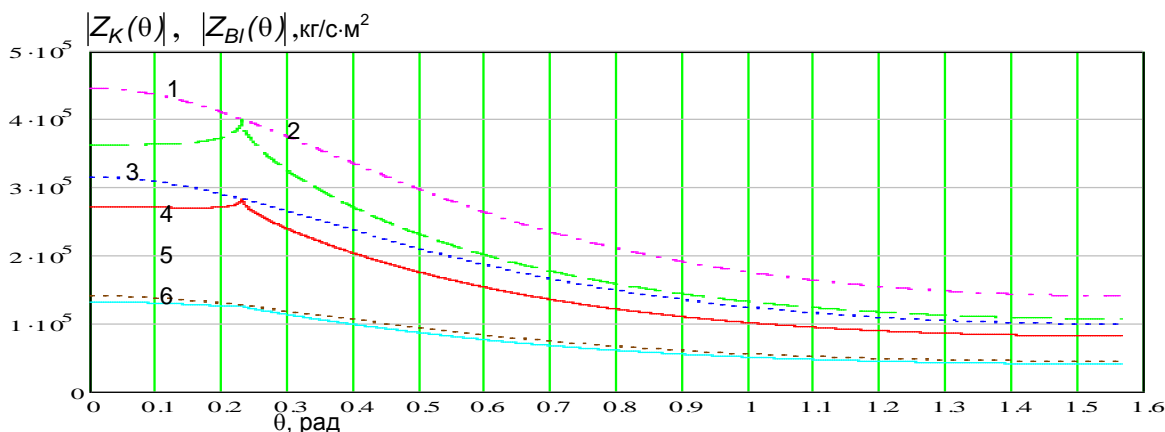


Рис.5 Зависимости модулей импеданса Константинова $|Z_K(\theta)|$ и входного импеданса жидкой поверхности $|Z_{BI}(\theta)|$ от угла падения

Из графиков, представленных на рис. 5, можно сделать следующие выводы. На каждой зависимости $|Z_{BI}(\theta)|$ имеется максимум, который наблюдается при $\theta = \theta_{кр}$. Величина этого максимума с ростом частоты уменьшается. На высоких частотах этот максимум практически исчезает. График $|Z_{BI}(\theta)|$ сглаживается и значения $|Z_{BI}(\theta)|$

монотонно убывают с ростом величины угла падения (см., например, кривую 6). При угле падения $\theta = \theta_{кр}$ величины модулей

$|Z_{BI}(\theta_{кр})| = |Z_K(\theta_{кр})|$, следовательно, поверхность жидкости ведет себя аналогично поверхности твердого тела. При углах падения $\theta \neq \theta_{кр}$ вы-

полняется неравенство $|Z_{Вl}(\theta_{кр})| < |Z_{К}(\theta_{кр})|$.

Особенно хорошо это неравенство наблюдается при углах $\theta < \theta_{кр}$, при которых входной импеданс (1) является чисто вещественной величиной.

Кривые, характеризующие изменения фазового угла входного импеданса (3) в зависимости от угла падения волны θ , показаны на рис. 6. Зависимости рассчитаны для частот: 1 – 5,0 кГц; 2 – 10,0 кГц; 3 – 50,0 кГц.

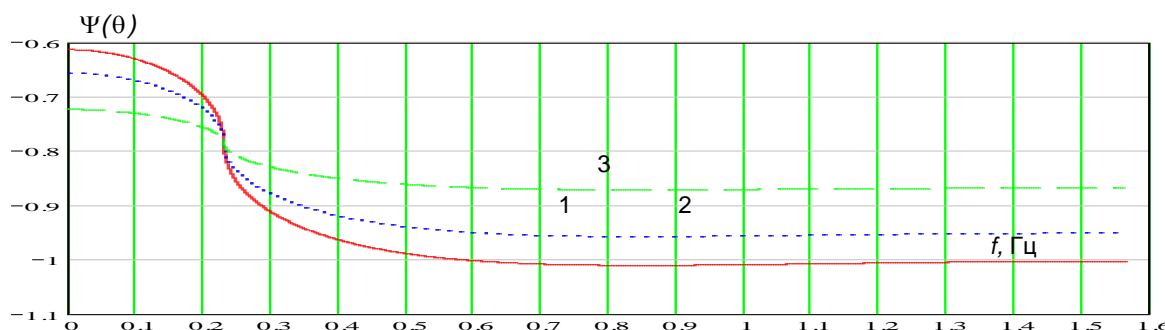


Рис. 6 Зависимости фазового угла от угла падения волны: 1 – 5,0 кГц; 2 – 10,0 кГц; 3 – 50,0 кГц

Из рис. 6 нетрудно заметить, что на всех частотах и при любых значениях угла падения волны θ , фазовые углы входного импеданса (3) имеют отрицательный знак. При $\theta = \theta_{кр}$ на всех частотах значение фазового угла падения волны $\Psi(\theta_{кр}) = -0,80$. Изменения угла падения волны θ в окрестности $\theta_{кр}$ приводит к скачку значений фазового угла $\Psi(\theta)$. Величина скачка $\Psi(\theta)$ зависит от частоты и, следовательно, от потерь энергии в АПС. Увеличение частоты сопровождается ростом диссипации энергии в АПС, что приводит к сглаживанию кривой $\Psi(\theta)$ (см. кривую 3).

Заключение

Полученное в работе выражение (3) для расчета входного импеданса границы газ-жидкость, в

котором учитывается диссипация энергии в АПС, поверхности жидкого полупространства, позволяет уточнить параметры акустического поля, возникающего при взаимодействии плоской звуковой волны с поверхностью раздела газ – жидкость. Формулу (3) можно также рекомендовать для расчета входного импеданса границы газ – резиноподобное тело.

Выражение для входного импеданса (3) целесообразно использовать на частотах, лежащих ниже 20,0 кГц. На высоких частотах результаты проведенных с помощью формул (2) и (3) практически совпадают. Для оценки параметров акустического поля волны, взаимодействующей с плоской поверхностью твердого тела во всем диапазоне частот можно использовать выражение входного импеданса Константинова (2).

Литература

1. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика неоднородных сред. Том 1 Основы теории отражения и распространения звука. – М.: Наука, 2007. – 443 с.
2. Константинов Б. П. О поглощении звуковых волн при отражении от твердой границы. ЖТФ, т.9, N3, 1939, с. 226-238.
3. Константинов Б. П. Гидродинамическое звукообразование и распространение звука в ограниченных средах. – Л.: Наука, 1974. – 144 с.
4. Легуша Ф. Ф. Эффект Константинова и поглощение звука в неоднородных средах. УФН, 1984, т. 144, №3, с. 509-522.
5. Легуша Ф. Ф. Расчет коэффициентов отражения и прохождения плоской волны на границе раздела жидких сред с учетом их вязкости и теплопроводности. – Письма в ЖТФ, 1982, т.9, № 22, с. 1390-1392.
6. Легуша Ф. Ф. Импеданс границы раздела жидких сред с учетом эффекта Константинова. – ЖТФ, 1984 т.54, №1, с. 181-183.
7. Легуша Ф. Ф. Поглощение Константинова на границе раздела жидких полупространств. – ЖТФ, 1984, т.54, № 4, с. 671-678.
8. Легуша Ф. Ф., Мусакаев М. А. Расчет коэффициентов отражения и прохождения звуковой волны, взаимодействующей с бесконечной границей двух жидких полупространств, с учетом поглощения звука в пограничном слое. Труды НТК «Кораблестроительное образование и наука - 2005» – СПб: Изд. центр СПбГМТУ, 2005. с. 384-389.
9. Таблицы физических величин. Справочник / Под. ред. акад. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1005 с.

References

1. Brehovskih L.M., Godin O.A. Acoustics inhomogeneous environment. Vol 1 Fundamentals of reflection and sound propagation theory. M.: Nauka, 2007. – 443 p.
2. Konstantinov B. P. About the absorption of sound waves reflected from a solid border. ZhTF, V.9, N3, 1939, p. 226-238.
3. Konstantinov B. P. Hydrodynamic sound creations and sound propagation in constrained environments. L.: Nauka, 1974. 144 p.
4. Legusha F. F. The Konstantinov effect and sound absorption in inhomogeneous media. Sov. Phys. Usp. 27(11), 1984, p. 887-894.
5. Legusha F. F. The calculation of the coefficients of reflection and transmission of plane waves at the interface of liquid environment with regard to their viscosity and thermal conductivity. Pis'ma v ZhTF, 1982, v.9, № 22, p. 1390-1392.
6. Legusha F. F. The impedance of the boundary liquid environment with regard to the Konstantinovs effect. ZhTF, 1984 v.54, №1, p. 181-183.
7. Legusha F. F. Konstantinovs absorption at the interface of liquid half-spaces. ZhTF, 1984, t.54, № 4, s. 671-678.
8. Legusha F. F., Musakaev M. A. The calculation reflection coefficients and transmission of sound waves interacting with an infinite boundary of the two liquid half-spaces, taking into account the absorption of sound in the boundary layer. Trudy NTK «Korablestroitel'noe obrazovanie i nauka - 2005» SPb: Izd. centr SPbGMTU, 2005. p. 384-389.
9. Tables of physical quantities. Guide / Pod. red. akad. I.K. Kikoina. –M.: Atomizdat, 1976. 1005 p.

УДК 532.5.032

МАЛЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА В ПОТОКЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Афанасов Евгений Николаевич

инженер, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
196158, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44
e-mail: zhenya.afanasov@yandex.ru, тел.: 8 (904) 612-58-02

Кадыров Сергей Газимурович

кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры математики
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3

АННОТАЦИЯ

В работе рассмотрен метод решения уравнений Навье-Стокса, применяющихся при описании малых по амплитуде движений твердого тела в потоке вязкой несжимаемой жидкости. Уравнения такой модели применены для решения плоской и осесимметричной задач о малых гармонических колебаниях твердого тела в потоке вязкой несжимаемой жидкости. Если в качестве независимых переменных выбрать потенциал скорости и функцию тока в теории идеальной жидкости, то задача может быть сведена к системе линейных уравнений для завихренности, составляющих вектора скорости и давления. Для решения этих уравнений разработан численный алгоритм, при построении которого применен переход к новым независимым координатам – потенциалу скорости и функции тока при обтекании тела идеальной жидкостью. В таких координатах область решения всегда представляет собой внешность некоторого отрезка, что облегчает построение разностной схемы, аппроксимирующей поставленную краевую задачу. В качестве модельных задач рассматриваются задачи о малых гармонических колебаниях цилиндра кругового сечения и сферы вдоль потока вязкой несжимаемой жидкости. Результаты расчетов сравниваются с численными результатами и теоретическими решениями, полученными другими авторами.

Ключевые слова: линеаризованные уравнения Навье-Стокса, малые колебания, вязкая несжимаемая жидкость.

SMALL OSCILLATIONS OF A RIGID BODY IN THE FLOW OF A VISCIOUS INCOMPRESSIBLE FLUID

Afanasov Evgeny Nikolaevich

engineer, Krylov Shipbuilding Research Institute,
196158, St. Petersburg, Moskovskoe shosse, 44
e-mail: zhenya.afanasov@yandex.ru, tel.: 8 (904) 612-58-02

Kadyrov Sergey Gazimurovich

PhD, docent,
The professor of the Department of Mathematics,
State Marine Technical University of Sankt-Petersburg
190008, St. Petersburg, Lotsmanskaya Str, 3
St. Petersburg, Russia

ABSTRACT

The paper examines a method of solution of the Navier-Stokes equations, which are used when describing small amplitude motions of a rigid body in the flow of a viscous incompressible fluid. The equations of such a model are applied to solving the plane and axisymmetric problems concerning small harmonic oscillations of a rigid body in the flow of a viscous incompressible fluid. If the independent variables to choose are the velocity potential and stream function as used in the theory of ideal fluid, then the problem can be reduced to a system of linear equations for vorticity, being the components of the velocity vector and pressure. To solve these equations a numerical algorithm is developed which is based on the transition to new independent coordinates – velocity potential and stream function in case when a perfect fluid encompasses and flows past a body. In such coordinates the solution region always lies outside a segment which facilitates the construction of a difference scheme, approximating the boundary value problem. In the context of the paper, the problems of small longitudinal harmonic oscillations of a cylinder of circular cross-section and a sphere in the flow of a viscous incompressible fluid are used as model problems. The results of calculations are compared with numerical results and the theoretical solutions obtained by other authors.

Введение

Задача определения гидродинамических сил, действующих на колеблющееся в потоке вязкой жидкости тело, является практически важной для самых разнообразных инженерных приложений от проектирования наноприборов [13] до расчета оффшорных конструкций [14].

В своей наиболее общей постановке ее решение можно получить лишь численно с помощью мощных программных комплексов. Тем не менее, существуют ситуации, в которых можно использовать линеаризованные постановки.

Классическая задача о малых колебаниях тел в вязкой несжимаемой покоящейся жидкости [6, 10] рассматривалась в работе [1], однако наличие однородного потока изменяет величины гидродинамических сил. Если считать поток «ползущим» то возможно применение подхода Озеена [3, 11, 12]. В настоящей статье для описания обтекания тела при малых числах Рейнольдса применяется более точная теория [2, 4].

Задача об обтекании вязкой несжимаемой жидкостью твердого тела, которое совершает движение в однородном потоке, описывается системой дифференциальных уравнений Навье-Стокса [5 – 9]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{V} \\ \text{div} \vec{W} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

здесь t – время, \vec{V} – вектор скорости, p – давление, ρ – плотность жидкости, ν – коэффициент кинематической вязкости.

Граничные условия для системы уравнений (1) имеют вид:

$$\begin{cases} \vec{V}|_{\Gamma(t)} = \vec{V}_m|_{\Gamma(t)} \\ \vec{V} \rightarrow U_\infty \vec{i}, |\vec{r}| \rightarrow \infty \end{cases}, \quad (2)$$

где \vec{V}_m – известный вектор скорости точек поверхности тела $\Gamma(t)$, U_∞ – скорость однородного потока.

Первое граничное условие – равенство скорости жидкости скорости тела, которое ставится на поверхности тела $\Gamma(t)$, совершающего движение в вязкой жидкости. Второе граничное условие означает, что на «бесконечности» скорость жидкости стремится к скорости набегающего однородного потока.

Будем строить решение задачи (1) – (2) в виде суммы

$$\begin{cases} \vec{V} = \vec{V}_0 + \vec{V}_1 \\ p = p_0 + p_1 \end{cases} \quad (3)$$

Здесь \vec{V}_0 и p_0 – решение задачи об установившемся обтекании вязкой несжимаемой жидкостью неподвижного твердого тела, которая описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} (\vec{V}_0 \cdot \nabla) \vec{V}_0 = -\frac{1}{\rho} \nabla p_0 + \nu \Delta \vec{V}_0 \\ \text{div} \vec{W}_0 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Функции \vec{V}_1, p_1 – нестационарные возмущения, которые должны быть определены таким образом, чтобы результирующее решение \vec{V} и p удовлетворяло уравнениям движения (1).

Для определения установившихся поля скоростей и давления будем использовать изложенную в [2, 4] теорию, которая заключается в линеаризации уравнений (4) на «фоне» поля скоростей идеальной жидкости, обтекающей тело.

Уравнения относительно функций \vec{V}_1 и p_1 получаются подстановкой (3) в систему (1). Таким образом, с учетом системы (4), получаем:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{V}_1}{\partial t} + \text{rot} \vec{V}_0 \times \vec{V}_1 + \text{rot} \vec{V}_1 \times \vec{V}_0 + (\vec{V}_1 \cdot \nabla) \vec{V}_1 = \\ = -\frac{1}{\rho} \nabla (p_1 + \rho \vec{V}_0 \vec{V}_1) + \nu \Delta \vec{V}_1 \\ \text{div} \vec{W}_1 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Уравнения системы (5) нелинейны. Если считать амплитуду колебаний тела A много меньше его характерного размера L ($A \ll L$), то в уравнениях (5) конвективными нелинейными членами $(\vec{V}_1 \cdot \nabla) \vec{V}_1$ можно полностью пренебречь и тем самым их линеаризовать [6]. Тогда из (5) получаем:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{V}_1}{\partial t} + \text{rot} \vec{V}_0 \times \vec{V}_1 + \text{rot} \vec{V}_1 \times \vec{V}_0 = \\ = -\frac{1}{\rho} \nabla (p_1 + \rho \vec{V}_0 \vec{V}_1) + \nu \Delta \vec{V}_1 \\ \text{div} \vec{W}_1 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Линеаризация граничного условия, для системы (6) дает:

$$\begin{cases} \vec{V}_1|_{\Gamma} = \vec{V}_m - (\vec{W} \cdot \nabla) \vec{V}_0|_{\Gamma} \\ \vec{V}_1 \rightarrow 0, |\vec{r}| \rightarrow \infty \end{cases}, \quad (7)$$

где \vec{W} – вектор перемещения точек поверхности тела, $\Gamma = \Gamma(0)$ – начальная поверхность тела.

Будем рассматривать случай обтекания вязкой несжимаемой жидкостью твердого тела, совершающего гармонические во времени колебания. Тогда вектор перемещения и вектор скорости точек тела будут иметь вид

$$\vec{W} = \vec{W}' e^{-i\omega t}, \vec{V}_m = \frac{\partial \vec{W}}{\partial t} = -i\omega \vec{W}' e^{-i\omega t},$$

где \vec{W}' – амплитуда колебаний твердого тела, ω – частота колебаний.

Решение для неизвестных функций \vec{V}_1 и p_1 в таком случае записывается в виде

$$\begin{cases} \vec{V}_1 = \vec{V}' e^{-i\omega t} \\ p_1 = p' e^{-i\omega t} \end{cases} \quad (8)$$

Здесь \vec{V}' , p' – амплитуды скорости и давления соответственно.

Преобразуем уравнения системы (6) к безразмерному виду. Выберем в качестве характерных величин линейный размер твердого тела L , давление в однородном потоке p_∞ , скорость однородного потока U_∞ , а в качестве временного масштаба частоту колебаний ω . Тогда в безразмерных величинах с учетом (8) уравнения системы (6) имеют вид (для простоты записи символы для обозначения безразмерных параметров опущены):

$$\begin{cases} -iSt\vec{V}' + rot\vec{V}_0 \times \vec{V}' + rot\vec{V}' \times \vec{V}_0 = \\ = -\nabla(p' + \vec{V}_0 \vec{V}') + \frac{1}{Re} \Delta \vec{V}' \\ div\vec{V}' = 0 \end{cases} \quad (9)$$

В этой системе уравнений $Re = \frac{U_\infty L}{\nu}$ – число

Рейнольдса; $St = \frac{\omega L}{U_\infty}$ – безразмерный частотный параметр (число Струхала), характеризующий колебательное движение.

Граничные условия для системы уравнений (9) в безразмерных величинах имеют вид

$$\begin{cases} \vec{V}'|_r = -iSt\vec{W}' - (\vec{W}' \cdot \nabla)\vec{V}_0|_r \\ \vec{V}' \rightarrow 0, |\vec{r}| \rightarrow \infty \end{cases} \quad (10)$$

1. Плоская задача о малых колебаниях твердого тела в потоке вязкой несжимаемой жидкости

В декартовых координатах в безразмерных величинах уравнения системы (9) имеют вид

$$\begin{cases} -iStu' - (v_{0x} - u_{0y})v' - (v'_x - u'_y)v_0 = \\ = -P_x + \frac{1}{Re} \Delta u' \\ -iStv' + (v_{0x} - u_{0y})u' + (v'_x - u'_y)u_0 = \\ = -P_y + \frac{1}{Re} \Delta v' \\ P = p' + u_0 u' + v_0 v' \\ u'_x + v'_y = 0 \end{cases} \quad (11)$$

В этой системе уравнений u_0 , v_0 – компоненты скорости жидкости при установившемся обтекании неподвижного твердого тела; u_1 , v_1 – компоненты вектора скорости \vec{V}' . Функцию P будем называть функцией давления.

Будем рассматривать твердое тело, совершающее гармонические во времени колебания вдоль потока (вдоль оси Ox) вязкой несжимаемой жидкости. В таком случае, в безразмерных вели-

чинах координаты вектора перемещения тела равны (здесь $A \ll L$ – амплитуда колебания):

$$W'_x = \frac{A}{L}; W'_y = 0.$$

Таким образом, граничные условия для системы уравнений (11) имеют вид

$$\begin{cases} u'|_r = -\alpha(iSt + u_{0x})|_r; v'|_r = -\alpha v_{0x}|_r; \\ u' \rightarrow 0, v' \rightarrow 0, r \rightarrow \infty \end{cases} \quad (12)$$

В (12) $\alpha = A/L$ – малый параметр.

Введем следующие обозначения для завихренности

$$v_{0x} - u_{0y} = \zeta_0, v'_x - u'_y = \zeta', \quad (13)$$

где ζ_0 , ζ' – единственные отличные от нуля координаты векторов $rot\vec{V}_0$ и $rot\vec{V}'$ соответственно.

Используя уравнение неразрывности – последнее уравнение системы (11), и определение завихренности ζ' (13) в декартовых координатах получаем уравнения для составляющих вектора скорости \vec{V}' :

$$\begin{cases} -(u'_{xx} + u'_{yy}) = \zeta'_y \\ -(v'_{xx} + v'_{yy}) = -\zeta'_x \end{cases} \quad (14)$$

Дифференцируя и комбинируя первые два уравнения системы (11), учитывая при этом (13) – (14), получаем систему уравнений, в которой неизвестные функции ζ' и P разделены:

$$\begin{cases} \frac{1}{Re} \Delta \zeta' + iSt \zeta' - u_0 \zeta'_x - \\ -v_0 \zeta'_y = \zeta_{0x} u' + \zeta_{0y} v' \\ -\Delta P = -2\zeta' \zeta_0 + \zeta'_y u_0 - \\ -\zeta'_x v_0 + \zeta_{0y} u' - \zeta_{0x} v' \end{cases} \quad (15)$$

Таким образом, плоская задача формулируется в виде линейных уравнений с известными коэффициентами для составляющих вектора скорости \vec{V}' (14) и функции давления P – второе уравнение системы (15) и уравнения для завихренности ζ' – первое уравнение системы (15), которое является линейным с известными переменными коэффициентами.

При построении численного метода решения этих уравнений применен переход к новым независимым координатам – потенциалу скорости ϕ и функции тока ψ при обтекании плоского контура идеальной жидкостью. В таких координатах, независимо от вида контура, область решения всегда представляет собой внешность некоторого отрезка, что облегчает построение разностной схемы аппроксимирующей поставленную краевую задачу [2, 4].

Численный метод решения плоской задачи рассмотрен на примере кругового цилиндра, совершающего малые гармонические колебания вдоль потока (вдоль оси Ox) вязкой несжимаемой жидкости. Для этой задачи ранее были определены установившиеся поле скоростей и давление [2].

Целью расчетов являлось вычисление коэффициента сопротивления, который в случае сим-

метричного обтекания плоского контура, совершающего малые гармонические колебания вдоль потока вязкой несжимаемой жидкости, определяется следующим образом [5, 8]:

$$C_D = \int_{\Gamma} \left(-(\rho_0 + p') \cos \theta - \frac{1}{Re} (\zeta_0 + \zeta') \sin \theta \right) dl \quad (16)$$

Здесь θ – полярный угол, dl – элемент длины плоского контура.

Потенциал ϕ и функция тока ψ для кругового цилиндра известны [7] (в качестве характерной длины L выберем диаметр кругового цилиндра):

$$\phi = x \left(1 + \frac{1}{4(x^2 + y^2)} \right), \quad \psi = y \left(1 - \frac{1}{4(x^2 + y^2)} \right).$$

Рассмотрим результаты численного решения задачи. Так как значения функций ζ' и p' прямо пропорциональны значениям параметра α , для представления результатов полагалось $\alpha=1$.

На рисунке 1 приведены значения модуля коэффициента C_D (16) для кругового цилиндра как функции от безразмерного частотного параметра St при различных значениях числа Re , полученного в результате численного решения задачи.

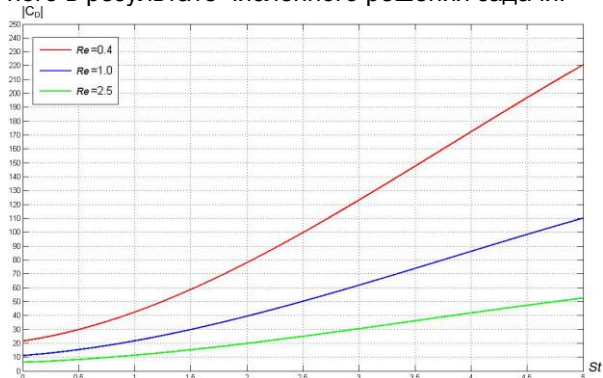


Рис. 2. Модуль коэффициента C_D в зависимости от St при различных значениях числа Re .

2. Осесимметричная задача о малых колебаниях твердого тела в потоке вязкой несжимаемой жидкости

Рассмотрим решение осесимметричной задачи о малых гармонических колебаниях твердого тела в потоке вязкой несжимаемой жидкости. В цилиндрических координатах r, z в безразмерных величинах уравнения системы (9) имеют вид

$$\begin{cases} -iStu' - (v_{0z} - u_{0r})v' - (v'_z - u'_r)v_0 = \\ = -P_z + \frac{1}{Re} \Delta u' \\ -iStv' + (v_{0z} - u_{0r})u' + (v'_z - u'_r)u_0 = \\ = -P_r + \frac{1}{Re} \left(\Delta v' - \frac{v'}{r^2} \right) \\ P = p' + uu' + vv' \\ u'_z + \frac{v'}{r} + v'_r = 0 \end{cases} \quad (17)$$

В этой системе уравнений Δ – оператор Лапласа в цилиндрических координатах, u_0, v_0 – компоненты вектора скорости жидкости при установив-

шемся обтекании неподвижного твердого тела; u', v' – компоненты вектора скорости \vec{V}' . Функцию P будем называть функцией давления.

В случае гармонических во времени колебаниях твердого тела вдоль потока (вдоль оси Oz) вязкой несжимаемой жидкости координаты вектора \vec{W}' записываются в следующем виде (в безразмерных величинах):

$$W'_z = \frac{A}{L}; W'_r = 0.$$

Граничные условия для системы уравнений (17) имеют вид

$$\begin{cases} u'|_r = -\alpha(iSt + u_{0z})|_r; v'|_r = -\alpha v_{0z}|_r; \\ u' \rightarrow 0, v' \rightarrow 0, r \rightarrow \infty \end{cases} \quad (18)$$

Введем следующие обозначения для завихренности

$$v_{0z} - u_{0r} = \zeta_0, \quad v'_z - u'_r = \zeta' \quad (19)$$

где ζ_0, ζ' – единственные отличные от нуля координаты векторов $rot \vec{V}_0$ и $rot \vec{V}'$ соответственно.

Используя уравнение неразрывности – последнее уравнение системы (17), и определение завихренности ζ' (19) получаем уравнения для составляющих вектора скорости \vec{V}' :

$$\begin{cases} \Delta u' = -\zeta'_r - \frac{1}{r} \zeta' \\ \Delta v' - \frac{v'}{r^2} = \zeta'_z \end{cases} \quad (20)$$

Учитывая (19) – (20) при дифференцировании и комбинировании первых двух уравнений системы (17) получаем систему уравнений, в которой неизвестные функции ζ' и P разделены:

$$\begin{cases} -iSt\zeta' - \frac{1}{Re} \left(\Delta \zeta' - \frac{\zeta'}{r^2} \right) + \zeta'_z u_0 + \zeta'_r v_0 - \frac{v_0}{r} \zeta' = \\ = \frac{v'}{r} \zeta_0 - \zeta_{0z} u' - \zeta_{0r} v' \\ -\Delta P = -2\zeta'_z \zeta_0 - \zeta_{0z} v' - \zeta'_z v_0 + \\ + u' \left(\zeta_{0r} + \frac{\zeta_0}{r} \right) + u_0 \left(\zeta'_r + \frac{\zeta'}{r} \right) \end{cases} \quad (21)$$

Таким образом, осесимметричная задача формулируется в виде уравнений для составляющих вектора скорости (20) и уравнений для завихренности и функции давления (21), которые являются линейными с известными переменными коэффициентами.

При построении численного метода решения уравнений (20) – (21) применен переход к новым независимым координатам – потенциалу скорости ϕ и функции тока ψ при обтекании осесимметричного контура идеальной жидкостью. В таких координатах, независимо от вида контура, область решения всегда представляет собой внешность некоторого отрезка, что облегчает построение разностной схемы аппроксимирующей поставленную краевую задачу [4].

Численный метод решения осесимметричной задачи рассмотрен на примере сферы, соверша-

ющей малые гармонические колебания вдоль потока вязкой несжимаемой жидкости. Теоретическое и численное решения такой задачи в постановке Озеена приведены в [11] и [12] соответственно.

Целью расчетов являлось вычисление коэффициента сопротивления, который в случае осесимметричного обтекания твердого тела, совершающего малые гармонические колебания вдоль потока вязкой несжимаемой жидкости, определяется следующим образом [5, 8]:

$$C_D = \iint_{\Gamma} \left(-(p_0 + p') \cos \theta - \frac{1}{Re} (\zeta_0 + \zeta') \sin \theta \right) dS \quad (22)$$

Здесь θ – угол сферической системы координат, dS – элемент площади поверхности.

Потенциал φ и функция тока ψ для сферы известны [7] (в качестве характерной длины L выберем радиус сферы):

$$\varphi = z \left(1 + \frac{1}{2 \left(\sqrt{z^2 + r^2} \right)^3} \right), \quad \psi = \frac{1}{2} r^2 \left(1 - \frac{1}{\left(\sqrt{z^2 + r^2} \right)^3} \right)$$

Рассмотрим результаты численного решения. При решении полагалось $\alpha=1$.

На рисунке 2 приведено сравнение модуля коэффициента C_D (22) для сферы как функции от безразмерного частотного параметра St при различных числах Re , полученного в результате численного решения задачи с теоретическими и численными результатами других авторов [11, 12].

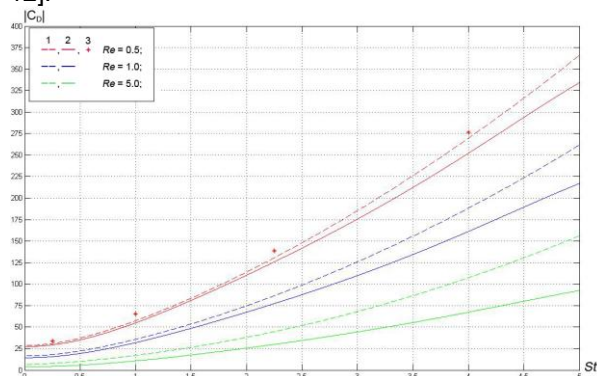


Рис. 2. Модуль коэффициента C_D в зависимости от St при различных значениях числа Re :

1 – теоретическое решение задачи в постановке Озеена [11]; 2 – численное решение задачи по предлагаемому в работе методу; 3 – численное решение задачи в постановке Озеена [12].

Из графиков на рисунке 2 следует, что разработанный численный метод решения осесимметричной задачи о малых гармонических колебаниях сферы вдоль потока вязкой несжимаемой жидкости позволяет получить, при малых значениях чисел Re и St , хорошее соответствие результатов расчета коэффициента сопротивления C_D (22) с теоретическими и численными результатами, полученными в [11, 12].

Заключение

Расчет амплитудных и частотных характеристик колеблющихся в вязкой жидкости тел важен при изучении и проектировании различных систем.

Изложенный в статье метод определения гидродинамических сил, действующих на колеблющееся гармонически во времени тело, находящееся в потоке вязкой несжимаемой жидкости может быть применен для решения такого рода задач.

Литература

1. Афанасов Е.Н. (2014). Малые колебания твердого тела в вязкой несжимаемой жидкости. Морские интеллектуальные технологии, 4(25), Т.1, 103-109.
2. Афанасов Е.Н., Кадыров С.Г. (2014). О методах решения плоской задачи обтекания тел вязкой несжимаемой жидкостью при малых числах Рейнольдса. Морские интеллектуальные технологии, 2(24) Т.2, 32-37.
3. Гузь А.Н. Динамика сжимаемой вязкой жидкости. Киев: А.С.К., 1998, 350 с.
4. Кадыров С.Г., Афанасов Е.Н. (2013). Об обтекании тел вязкой несжимаемой жидкостью при малых числах Рейнольдса. Труды Крыловского государственного научного центра, 73(357), 165-172.
5. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика, ч.II. М., Физматгиз, 1963, 728 с.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.VI. Гидродинамика. Изд-е 5-е, стереот. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001, 736 с.
7. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003, 840 с.
8. Слэзкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. Гос. Изд-во технико-теоретической литературы, 1955, 520 с.
9. Шкадов В.Я., Запryanов З.Д. Течения вязкой жидкости. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984, 200 с.
10. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974, 712 с.
11. Phillip M. Lovalenti, John F. Brady (1993). The force on a sphere in a uniform flow with small-amplitude oscillations at finite Reynolds number. J. Fluid Mech., vol. 256, pp. 607-614.
12. Mei R., Lawrence J., Adrian J. (1991). Unsteady drag on a sphere at finite Reynolds number with small fluctuations in the free-stream velocity. J. Fluid Mech., vol. 233, pp. 613-631.
13. Li M. W., Bhiladvala R. B., Morrow T. J., Sioss J. A., Lew K.-K., Redwing, J. M., Keating C. D., Mayer T. S. (2008). Bottom-up assembly of large-area nanowire resonator arrays. Nature Nanotechnology, vol. 3, No. 2, pp. 88-92.
14. Anaturk A. R., Tromans P. S., van Hazendonk H. C., Sluis C. M., Otter A. (1992). Drag Force on Cylinders Oscillating at Small Amplitude: A New Model. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, vol. 114, No. 1, pp. 91-103.

References

1. Afanasov E.N. (2014). Malye kolebaniya tverdogo tela v vyazkoy neszhimaemoy zhidkosti. Morskie intelektual'nye tekhnologii, 4(25), T.1, 103-109.
2. Afanasov E.N., Kadyrov S.G. (2014). O metodakh resheniya ploskoy zadachi obtekaniya tel vyazkoy neszhimaemoy zhidkost'yu pri malykh chislakh Reynol'dsa. Morskie intelektual'nye tekhnologii, 2(24) T.2, 32-37.
3. Guz' A.N. Dinamika szhimaemoy vyazkoy zhidkosti. Kiev: A.S.K., 1998, 350 p.
4. Kadyrov S.G., Afanasov E.N. (2013). Ob obtekaniy tel vyazkoy neszhimaemoy zhidkost'yu pri malykh chislakh Reynol'dsa. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra, 73(357), 165-172.
5. Kochin N.E., Kibel' I.A., Roze N.V. Teoreticheskaya gidromekhanika, ch.II. M., Fizmatgiz, 1963, 728 p.
6. Landau L.D., Lifshits E.M. Teoreticheskaya fizika. T.VI. Hidrodinamika. Izd-e 5-e, stereot. M.: FIZMATLIT, 2001, 736 p.
7. Loytsyanskiy L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza. M.: Drofa, 2003, 840 p.
8. Slezkin N.A. Dinamika vyazkoy neszhimaemoy zhidkosti. Gos. Izd-vo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1955, 520 p.
9. Shkadov V.Ya., Zapryanov Z.D. Tcheniya vyazkoy zhidkosti. – M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1984, 200 p.
10. Shlikhting G. Teoriya pogranchnogo sloya. M.: Nauka, 1974, 712 p.
11. Phillip M. Lovalenti, John F. Brady (1993). The force on a sphere in a uniform flow with small-amplitude oscillations at finite Reynolds number. J. Fluid Mech., vol. 256, pp. 607-614.
12. Mei R., Lawrence J., Adrian J. (1991). Unsteady drag on a sphere at finite Reynolds number with small fluctuations in the free-stream velocity. J. Fluid Mech., vol. 233, pp. 613-631.
13. Li M. W., Bhiladvala R. B., Morrow T. J., Sioss J. A., Lew K.-K., Redwing, J. M., Keating C. D., Mayer T. S. (2008). Bottom-up assembly of large-area nanowire resonator arrays. Nature Nanotechnology, vol. 3, No. 2, pp. 88-92.
14. Anaturk A. R., Tromans P. S., van Hazendonk H. C., Sluis C. M., Otter A. (1992). Drag Force on Cylinders Oscillating at Small Amplitude: A New Model. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, vol. 114, No. 1, pp. 91-103.

УДК 504.054:627.54

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТЕКАНИЯ НЕФТИ В ЛЕДОВОМ СУДОХОДНОМ КАНАЛЕ

Зуева Екатерина Сергеевна
аспирант кафедры Океанотехники
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: zueva_ekaterina_smtu@mail.ru

Аннотация

В статье представлены результаты исследования двух проблем, определяющих процесс распространения в судоходном ледовом канале нефтяного разлива. Статистические данные о ледовых условиях в пределах канала являются основой для прогнозирования распространения разлива нефти. В ходе работы был разработан специальный метод анализа фотографий реальных ледовых каналов, образованных ледоколами и судами ледового плавания, а также была выполнена обработка ряда этих фотографий. В результате создания статистической модели судоходного ледового канала было получено логнормальное распределение размеров отдельных льдин. Модель дает возможность оценить общую длину боковой поверхности льдин, которая определяет сопротивление трения для потока нефти в канале. Кроме того, была создана аналитическая модель растекания нефти в судоходном канале, которая учитывает трение нефти о поверхность воды, о границы канала и о боковые грани льдин. В результате было получено дифференциальное уравнение, решение которого дает возможность оценить скорость движения нефтяного пятна вдоль канала. Основным преимуществом исследования является создание аналитической модели распространения разлива нефти в судоходном ледовом канале, благодаря чему стало возможным принимать во внимание ледовые условия и характеристики сырой нефти.

Ключевые слова: нефтяной разлив, арктический шельф, ледовый судоходный канал, статистическая модель канала, математическая модель нефтяного разлива, операции ЛАРН, ледовые условия, оптические искажения.

INVESTIGATION OF OIL SPREADING IN ICE NAVIGATION CHANNEL

Zueva Ekaterina Sergeevna
the postgraduate student of DEPARTMENT OF OCEAN TECHNOLOGY ,
STATE MARINE TECHNICAL UNIVERSITY OF SAINT-PETERSBURG
Lotsmanskaya, 3, St. Petersburg 190008, Russian Federation
e-mail: zueva_ekaterina_smtu@mail.ru

Abstract

Paper presents results investigations of two problems that define process of the oil spill spreading within navigable ice channel. Statistical data about the ice conditions within channel is initial base for forecast of oil spill spreading. Special method for analyze the pictures of real ice channels after icebreakers and icegoing vessels was developed and processing of different pictures was performed. As a result, statistical model of navigable ice channel was created the main point of which is the lognormal distribution of the ice floes dimensions. Model gives possibility to evaluate the total length the ice floes lateral surface that determines the friction resistance for the oil flow within channel. In addition, the analytical model of oil flow within channel considers the friction on water surface within channel and friction on lateral surfaces of channel and ice floes. As result differential equation was developed decision of which gives possibility to evaluate the rate of oil slick edge movement along channel.

The main advantage of study is the analytical model of oil spill spreading within the navigable ice channel that give possibility to take into account the ice conditions and crude oil characteristics.

Key words: oil spill, the Arctic shelf, ice navigation channel, the statistic model of channel, the mathematical model of the oil spill, oil spill response operations, ice conditions, optical distortion.

Введение

Локализация и ликвидация аварийных разливов нефти - сложная техническая задача, особенно в зимних условиях, когда акватория покрыта льдом, в который проникает нефть. Это затрудняет использование оборудования, предназначенного для её сбора. Для того чтобы успешно решить эту проблему, необходимо иметь как можно больше информации о произошедшем разливе, а также о месте нахождения нефтяного пятна в конкретное время для оперативного реагирования экологических служб.

Таким образом, основной целью работы являлось создание методики прогнозирования растекания нефти между льдинами по судоходному каналу.

В ходе выполнения работы решались следующие задачи:

1) Исследование ледовых условий в канале за судном и определение характеристик, заполняющих его льдин.

2) Создание статистической модели ледового канала для исследования геометрических характеристик отдельных льдин, так как основной составляющей сопротивления растеканию нефти является боковая поверхность льдин, которая оказывается тем больше, чем меньше размеры отдельных льдин при одинаковой сплоченности.

3) Усовершенствование математической модели распространения нефти по судоходному ледовому каналу.

4) Моделирование распространения нефти по ледовому каналу.

1. Методика восстановления реальной формы ледового канала и заполняющих его льдин, а также анализ использованных фотоснимков анализ математической модели растекания нефти судоходных ледовых каналов

Известно, что скорость распространения разлившейся нефти в пределах ледового канала зависит от его ширины, концентрации льда, размеров и формы отдельных льдин. [1] Информацию о состоянии ледовых каналов можно получить при помощи фотографирования их с борта судна, но в этом случае имеют место существенные оптические искажения формы льдин и самого канала. Данный способ получения наглядных результатов является одним из самых доступных и экономически менее затратных. Для разработки методики обработки фотографий льдин, сделан-

ных с борта судна, идущего за ледоколом, были проведены модельные эксперименты.

Простейший способ обработки фотографии заключается в предварительной оценке искажения, вызываемого отображением на плоскость пространственной картины.

Расчеты, проведенные по данному методу, показали, что результаты имеют недостаточно высокую точность, так как погрешность вычислений определяется дистанцией от точки расположения фотоаппарата до объекта, углом обзора, фокусным расстоянием объектива (коэффициент трансфокации) и т.п. Одним из важнейших параметров является угол наклона фотоаппарата, при котором производилась съемка. Ошибка при измерении этого угла всего в несколько градусов дает погрешность преобразования от единиц до десятков процентов. Таким образом, проведение фотосъемки превращается в сложный технологический процесс.

Для повышения точности обработки фотографий и упрощения данного процесса был произведен поиск средств и методов по преобразованию площадей фотоизображений в истинный вид.

Хорошие результаты можно получить, используя профессиональные программы для обработки фотоизображения, такие как Adobe Photoshop или GIMP, позволяющие «исправлять» перспективу на снимках.

С помощью данной методики восстанавливалась реальная форма ледового канала и заполняющих канал льдин, регистрировалась форма льдин и их размеры. Погрешность методики оценивалась путем обработки специальных тестовых моделей ледового канала и составляет не более 5% при наклонах оси фотокамеры в момент съёмки в пределах от 15° до 50° от горизонта.

Для определения достоверности полученных результатов применялись вероятностные методы обработки данных. Целесообразно было использовать в работе распределение Стьюдента. В данной работе обрабатывалось 28 фотоснимков.

Результаты статистической обработки позволяют определить диапазон углов фотографирования ледового канала с заранее определенной допустимой погрешностью.

На рисунке 1а показан фотоснимок модели канала, выполненный под углом 47 градусов, затем с помощью Программы Adobe Photoshop он был трансформирован к виду, соответствующему фотосъемке под углом 90° к горизонту (Рис.1б).



а



Рис. 1. Тестовая модель ледового канала.

По этой методике возможно преобразование фотографии судоходного ледового канала с борта судна в изображение близкое к снимкам со спутников и самолетов. При этом погрешность преобразования составляет менее 5%.

Был произведен анализ 14 фотоснимков судоходных ледовых каналов, сплоченность битого льда в которых находилась в пределах от 5 до 7 баллов. Для обеспечения статистической значимости на фотоснимках выбирались фрагменты (в продольном направлении канала), где количество четко различаемых льдин превышало 50 штук. Выполненный анализ показал, что основная масса льдин в каналах имеет трапециевидную форму, а их наибольший поперечный размер лежит в

диапазоне от 0,25 до 0,4 средней ширины ледового канала.

По результатам регистрации размеров льдин на каждом фотоснимке рассчитывалась площадь льдин, которые затем нормировались по среднему значению. Далее определялась дисперсия выборки, строились гистограммы. Полученные выборки сравнивались по критерию Стьюдента. Сравнение показало, что различие между выборками не значимо при 95% уровне значимости. Это

дало основание создать суммарный массив результатов, оценить его дисперсию и построить гистограмму, которая, как показал анализ, близка к логнормальному распределению. Установлена связь между средним и дисперсией логнормального распределения и статистическими характеристиками массива.

На Рисунке 2 представлены фото с оптическими искажениями льдин и его «исправленный» фрагмент.



а) фото ледового канала



б) фрагмент фото с «исправленной» перспективой.

Рис. 2. Фото ледового канала и его «исправленный» фрагмент.

Результат представлен на диаграмме (Рис.3).

Был проведен анализ распределения площадей льдин в судходном канале, приведенном на фото.

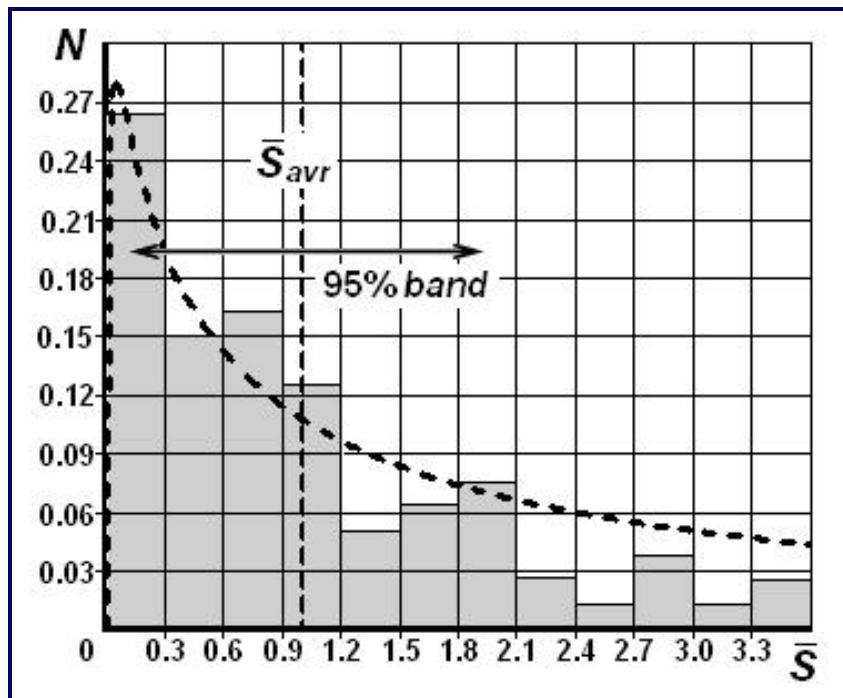


Рис. 3. Функция распределения площадей льдин в приведенном ледовом канале

2. Анализ и усовершенствование существующей математической модели растекания нефти в ледовых условиях

За основу была взята математическая модель распространения нефти в ледовых условиях, созданная проф. Гончаровым В.К. ранее [1,2,3]

Сопrotивление распространению нефти в канале равно сумме 2-х главных компонентов: трения нефти о водную поверхность и трения о стенки плавучих льдин.

Для оценки сопротивления потоку нефти нужно учитывать периметр, концентрацию льда в пределах канала. Полагалось, что все плавучие льдины в пределах ледяного канала имеют круглую форму и ту же самую площадь, как и реальные льдины. В итоге была получена формула, с помощью которой можно рассчитать время распространения аварийного разлива нефти в ледовом канале,

$$t = k_{IC} R^{7/3} \left(R^{0.5} + k_{IO} \frac{V_p^{0.5} \bar{P}_{VF} Q}{V_w^{0.5} f_{ice}^{0.5} B_{VP}^2} \right)^{2/3} \left[\frac{4g V_w^{-0.5} \rho_w - \rho_p Q^2}{c_f \rho_w B_{VP}^2} \right]^{-2/3} \quad (1)$$

В этом выражении k_{IC} – эмпирический коэффициент. k_{IO} – коэффициент для пары трения нефть - лед. Утечку нефти можно рассмотреть как вытекание жидкости из некоторого объема Q . \bar{P}_{VF} – периметр стенок всех плавучих льдин в пределах канала (плюс внешние края канала) на единицу длины канала, B_{VP} – ширина нефтяного пятна, равная площади свободной ото льда ледового канала на единицу длины, f_{ice} – средний размер поперечного сечения плавучих льдин в судходном канале, V_p – кинематическая вязкость нефти, V_w – кинематическая вязкость морской воды, $c_f = 1.328$ коэффициент, ρ_w – плотность морской воды, ρ_p – плотность нефти. Время t можно посчитать лишь тогда, когда край нефтяного пятна будет на расстоянии R от места разлива нефти из танкера. Известно, что с уменьшением размера льдин, увеличивается их суммарный периметр. Соответственно, этот факт должен учитываться при расчете трения о лед.

Исходя из проведенного статистического анализа размеров битого льда в канале, следует при расчете использовать не средние размеры

льдин, а периметры, связь между которыми определяет коэффициент Δ , представленный ниже.

Вообще, нам известны для некоторого канала h_{ice} (толщина льда) и φ_V (концентрация льда в канале). Нахождение количества льдин N не составляет трудностей.

Нужно найти периметр всех льдин.

Из уравнения Каштеляна получаем b_s – средний характерный размер льдины. В нашем случае, эквивалентный диаметр.

$$b_s = 0.54 \cdot h_{ice} + 0.45 \quad (2)$$

Средний периметр

$$P_n = \frac{P_{sum}}{N} \quad (3)$$

Средний размер по периметру

$$b_p = \frac{P_n}{\pi} = \frac{P_{sum}}{\pi N} \quad (4)$$

Связь между средним размером и средним по периметру

$$\Delta = \frac{b_p}{b_s} \quad (5)$$

Для любого канала $\Delta = \text{const}$

Алгоритм расчета:

Находим эквивалентный диаметр по формуле 2

Определяем b_p

$$b_p = b_s \cdot \Delta \quad (6)$$

Определяем суммарную площадь льда на единицу длины канала.

$$S = B_v \cdot \varphi_V \cdot L \quad (7),$$

Находим количество

льдин

$$N = \frac{P_{sum}}{P_n} \quad (8)$$

Находим суммарный периметр, принимая, что форма всех льдин – круг, соответствующий по площади реальным льдинам.

$$P = \pi \cdot d \quad (9)$$

$$S = \pi \cdot r^2 \quad (10)$$

$$N = \frac{4S}{\pi b_s^2} \quad (11)$$

$$P_{sum} = \pi \cdot N \cdot b_p \quad (12)$$

$$P_{SUM} = \frac{4\pi \cdot S \cdot L \cdot b_p}{\pi \cdot b_s^2} = \frac{4B_v \cdot \varphi_V \cdot L \cdot b_p}{b_s^2} \quad (13)$$

$$P_{SUM} = \frac{4B_v \cdot \varphi_V \cdot \Delta \cdot L}{b_s} \quad (14)$$

Таким образом, была создана усовершенствованная модель растекания нефти, основывающаяся на учете толщины льда, что позволяет получать более достоверные результаты при оценочном предварительном расчете.

Сведения о размерах и форме льдин, заполняющих судоходный ледовый канал, необходимы для прогнозирования растекания нефти после аварийного разлива, так как основной составляющей сопротивления растеканию нефти является боковая поверхность льдин.

Кроме того, эти сведения нужны для моделирования импульсных нагрузок на корпус судна при его движении в битых льдах, которые необходимо воспроизводить для обучения судоводителей на навигационных тренажерах.

Литература

- Frolova I.E., Gavrilov V.P., 1997. Sea Ice, Reference Manual, Leningrad, Gidrometeoizdat.
- Levin I.M., Radomyslskaya T.M., Osadchy V.Yu., Rybalka N.N., Aleshin I.V., Goncharov V.K., Klementieva N.Yu., Jing Zhou, Zhijun Li, 2009. Possibility of oil film detection on the ice cover of the sea surface. Proc. 32nd Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP). Technical on Environmental Contamination and response. Edmonton, Alberta. Canada. Vol. 2. pp. 781 – 789.
- Levin I.M., Radomyslskaya T.M., Osadchy V.Yu., Rybalka N.N., Aleshin I.V., Goncharov V.K., Klementieva N.Yu. 2009. Optical methods of detection of oil spill under an ice-cover. Proceedings of International Conference on Subsea Technologies (SubSeaTech 2009). Saint-Petersburg, Russia, 7 p, CD-ROM.
- Qin Jianmin, Wang Lijuan, Aleshin Igor V., Goncharov Vadim K., 2010. Realization of the Auto-Measurement of ice in riverway based on the difference of the air, ice and water. Proc. 20th IAHR International Symposium on Ice. Lahti, Finland, CD-ROM. Paper 068.
- Zhukov L.A., 1976. Total Oceanology. Leningrad, Gidrometeoizdat. 376 p.
- Zubov N.N., 1945. Arctic Ices. Moscow, Glavsevmorput.



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. Акт экспертизы на открытую публикацию (при необходимости)
4. 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 выставяемому по запросу счету.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала не несет ответственности за возможный ущерб, вызванный публикацией статьи. Если публикация статьи повлекла нарушение чьих-либо прав или общепринятых норм научной этики, то редакция журнала вправе изъять опубликованную статью.

Главный редактор научного журнала
"МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

д.т.н. проф. Никитин Н.В.

УДК 629.12.001.2

ИНСТРУКЦИЯ ПО ПОДГОТОВКЕ СТАТЕЙ для научного журнала "МОРские ИНтеллектуальные ТЕХнологии"

Никитин Николай Васильевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры проектирования судов
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: morintex_spb@mail.ru

Аннотация

В работе предлагаются правила оформления статей для научного журнала «Морские интеллектуальные технологии» в текстовом процессоре MS Word 97-2003 по требованиям для публикации в научном журнале ВАК, а также международных реферативных баз данных Scopus и Web of Science. Инструкция представляет собой специальную заготовку, которая служит базисом для создания конкретной статьи.

Аннотация предоставляется авторами в расширенном виде. Объем: не менее 950 и не более 1800 знаков (с пробелами), то есть 100-250 слов. В аннотации должны быть четко определены цель работы, ее новизна, представлены основные выводы. Языки – русский и английский.

Типичная структура аннотации: состояние вопроса; материалы и/или методы исследования, результаты; заключение.

Методы в аннотации только называются. Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и выводам, которые, по мнению автора статьи, имеют практическое значение. Следует указать пределы точности и надёжности данных, а также степень их обоснования. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.

Ключевые слова: Список ключевых слов должен характеризовать предметную область исследования. Недопустимо использование терминов общего характера (например, проблема, решение), не являющихся специфической характеристикой публикации. Количество ключевых слов должно быть 8-10.

GUIDELINES FOR PREPARATION OF ARTICLES FOR THE ACADEMIC PERIODICAL «MARINE INTELLIGENCE TECHNOLOGIES»

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 8–10.

Введение

При подготовке статей у авторов нередко возникают трудности, связанные с необходимостью жестко выдерживать требуемые форматы подготовки текстов.

Вместе с тем, в современных текстовых процессорах существуют развитые средства поддержки общезначимых и специализированных шаблонов, автоматизирующих эту деятельность. Учитывая вышесказанное, автор данной инструкции подготовил специализированный шаблон создания самема 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 непереводаемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Англоязычное название должно быть грамотно с точки зрения английского языка, при этом по смыслу полностью соответствовать русскоязычному названию.

Обращаем внимание авторов на необходимость обеспечить высокое профессиональное качество перевода на английский язык. Автоматизированный перевод с помощью программных систем категорически запрещается! При обнаружении экспертом Редакции низкого качества перевода статья отклоняется!

Возможности систем SCOPUS и Web of Science позволяют проводить исследования: по ссылкам, оценивать значение и признание работ конкретных авторов, научный уровень журналов, организаций и стран в целом, определять актуальность научных направлений и проблем, выявлять их точки роста и падения и т.д. Ссылка на публикацию в научной статье является одним из главных показателей качества публикации. А статья с представительным списком литературы демонстрирует профессиональный кругозор и качественный уровень исследований ее авторов

Полный текст должен быть структурированным по разделам. Структура полного текста рукописи, посвященной описанию результатов оригинальных исследований, должна соответствовать общепринятому шаблону и содержать разделы: введение (актуальность), цель и задачи, материалы и методы, результаты, выводы, обсуждение (дискуссия).

1. Инсталляция заготовки Mor-Inst

Вы получили по электронной почте (или некоторым другим способом) файл **Mor-Inst.doc** и должны использовать его на своем текстовом процессоре MS Word 97-2003.

Для того, чтобы начать работу необходимо: скопировать на Ваш компьютер файл **Mor-Inst.doc**, переименовав его под фамилией первого автора (например, **nikitin.doc**).

После выполнения этих действий Ваш текстовый процессор MS Word 97-2003 готов для создания документа в формате camera ready для оформления номера.

2 Начало работы с заготовкой Mor-Inst

Итак, предположим, что Вы скопировали заготовку **Mor-Inst.doc** для своего текстового процессора MS Word 97-2003, как это определено в предыдущем разделе данной инструкции.

Теперь, после вызова текстового процессора MS Word 97-2003, из опции основного меню **File (Файл)** выбирайте подопцию **Open (Открыть)**, а на приглашение выбрать файл отметьте **nikitin.doc** и нажмите клавишу **OK**.

После этого Ваш текстовый процессор открывает документ с данной заготовкой, который существенно облегчит Вашу дальнейшую работу.

Дальнейшая подготовка статьи очень похожа на редактирование "чужого" текста и преобразование его к виду, когда он станет Вашим.

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).

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 sample сам является примером нужной организации текста статьи):

- УДК.
- Заголовок работы.

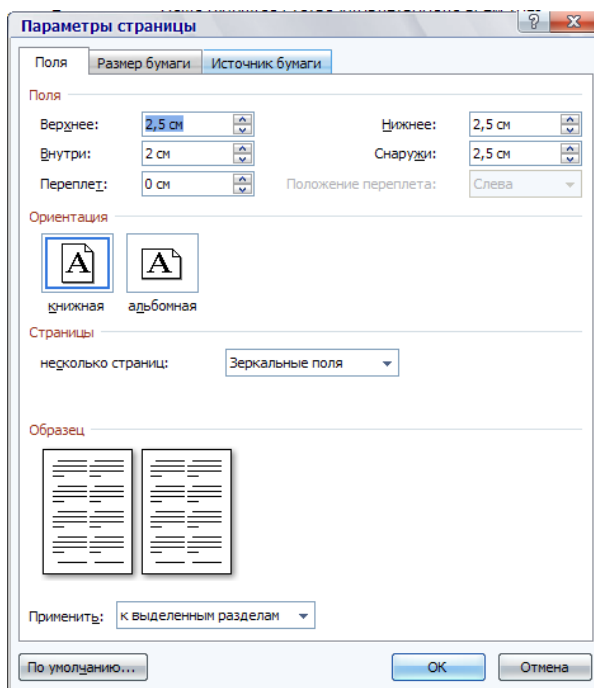


Рис. 1. Общий Layout страницы

- Имя (полностью), Отчество (полностью), Фамилия (полностью).

- Ученое звание и ученая степень (полностью).

- Должность, организация.

- Адрес автора (телефон и электронный адрес, если имеется).

- Если авторов несколько, их фамилии упорядочиваются по алфавиту.

- Аннотация работы (не менее 950 и не более 1800 знаков (с пробелами), то есть 100-250 слов).

- Ключевые слова (8-10).

- Разделы и подразделы основного текста (нумерация сквозная арабскими цифрами у разделов и номер раздела + нумерация сквозная арабскими цифрами у данного подраздела; номер раздела и номер подраздела отделяются друг от друга точкой; после номера раздела (подраздела) ставится точка, а название раздела (подраздела) начинается с заглавной буквы, после заголовков точка не ставится).

- В конце работы (перед списком литературы) может быть нумерованный раздел **Благодарности**, где, как правило, указываются спонсоры (например, номер гранта РФФИ) данной работы.

- Список использованных источников, собранных в нумерованном разделе **Литература** - После списка литературы размещается список литературы в романском алфавите в нумерованном разделе **References**

- Все заголовки разделов и подразделов центрируются.

- Ссылки на литературу в тексте работы заключаются в квадратные скобки и даются сквозной нумерацией арабскими цифрами.

Заголовок работы, ФИО, ученое звание, ученая степень, должность, организация, адрес авторов (телефон и электронный адрес, если имеется), аннотация работы и ключевые слова публикуются на русском и английском языках.

3.2. Шрифты, используемые при подготовке статьи

Все шрифты, используемые при подготовке статьи, выбираются из набора **Arial**. Если Вы пользуетесь данным sampler'ом, все размеры будут выставлены правильно и Вам останется только следовать им. Если же Вы пользуетесь твердой копией данного sampler'a, то используйте следующие размеры шрифтов:

- для названия статьи **Arial 13 прописной, жирный**;
- для УДК и идентификации автора (ов) статьи **Arial 9 курсив**;
- для адреса (ов) автора (ов) статьи **Arial 9**;
- 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**.

3.3. 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**². Каждое графическое изображение должно представлять собой **единый, цельный** объект.

По возможности используйте для графического материала минимально требуемое разрешение. Это существенно уменьшает объем пересылаемого материала.

Во всех случаях обращайтесь внимание на то, чтобы текстовые подписи на рисунках были набраны с использованием тех же шрифтов, что и основной текст и меньшим размером.

² Статьи с рисунками, нарисованными в тексте документа с помощью панели "Рисование" MS Word 97-2003, рассматриваются редакцией в индивидуальном порядке по согласованию с авторами статей.

3.4. Использование таблиц

В работе допускается использование таблиц, подготовленных стандартными средствами MS Word 97-2003. В качестве примера ниже дается представление таблицы, подготовленной с помощью этих средств (табл. 1).

Таблица набирается меньшим кеглем.

Слово таблица **Arial 8,5, курсив, вправо, абзацный отступ 0**.

Название таблицы **Arial 8,5, жирный, по центру, интервал снизу 4 пт, абзацный отступ 0**.

Текст в таблице **Arial 8,5**.

Таблица 1

Пример таблицы

N/N	Колонка-1	Колонка-2	Колонка-3	Колонка-4
1.	фффф	ыыыы	111	Ммм
2.	фффф	ыыыы	111	Ммм
3.	фффф	ыыыы	111	Ммм
4.	фффф	ыыыы	111	Ммм

Перед и после таблицы одна пустая строка основного текста.

ФОРМУЛЫ И РИСУНКИ НЕ РАЗМЕЩАТЬ В ТАБЛИЦЕ!!!

3.5. Использование формул

В работе допускается использование формул любой сложности, поддерживаемых компонентой MS Equation.

Если формула появляется в тексте как отдельная строка, она должна быть центрирована и, при необходимости, помечена сквозной нумерацией арабскими цифрами в круглых скобках. Если формула появляется внутри текста, обращайтесь внимание на размеры используемых шрифтов, чтобы они были «состыкованы» с размерами текста работы.

Ниже приводятся примеры формул в тексте и в отдельной строке.

Данный пример иллюстрирует использование формулы в тексте $\sum_{n=1}^{n=K} x_n^k \cdot 1,25$. Здесь при подго-

товке формулы использованы установки шрифтов by default (по умолчанию). По возможности, пользуйтесь этим способом для подготовки не только формул в тексте статьи, но формул в отдельной строке (1).

$$\forall x \in [a, b] F(x) \leq \pi \quad (1)$$

Все формулы набираются тем же шрифтом, что и основной текст.

ФОРМУЛЫ НЕ СОХРАНЯТЬ КАК РИСУНОК!!!

Если же это, по каким-либо причинам неудобно и/или невозможно, воспользуйтесь установками, приведенными на рис. 2.

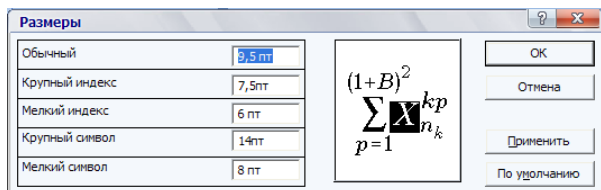
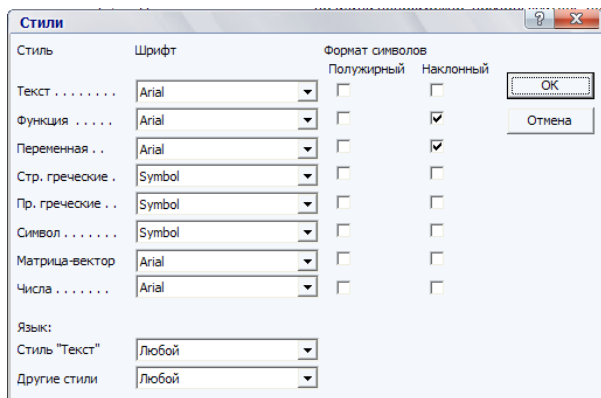


Рис. 2. Установки шрифтов и размеров в MS Equation

Обратите внимание на то, что при наборе формул в тексте, возможно изменение «интервальности». Не бойтесь этого и не пытайтесь уменьшить размер используемого шрифта до нечитаемого уровня. Аналогичное замечание справедливо и для формул, располагаемых в отдельной строке.

3.6. Размещение элементов текста на две колонки

Если таблицы, формулы, рисунки превышают размер одной колонки, то их размещают на **полный формат** (на 2 две колонки).

При этом сохраняются все требования по шрифтам и размерам к этим элементам, когда они набраны на формат одной колонки.

4. Заключительные замечания

Автор данной инструкции руководствовался единственной целью – уменьшить авторам сложность подготовки статей для журнала.

Таблица 2

Пример таблицы на полный формат

N/N	Колонка-1	Колонка-2	Колонка-3	Колонка-4	Колонка-5
1.	фффф	ЫЫЫЫ	111	МММ	ТТТТ
2.	фффф	ЫЫЫЫ	111	МММ	ТТТТ
3.	фффф	ЫЫЫЫ	111	МММ	ТТТТ
4.	фффф	ЫЫЫЫ	111	МММ	ТТТТ

Пример формулы на полный формат:

$$N_y(t) = \frac{Eh}{1-\mu^2} \left[\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{w}{R} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial w_0}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} \right] = \frac{Eh}{1-\mu^2} \xi(t). \tag{2}$$

Пример рисунка на полный формат:

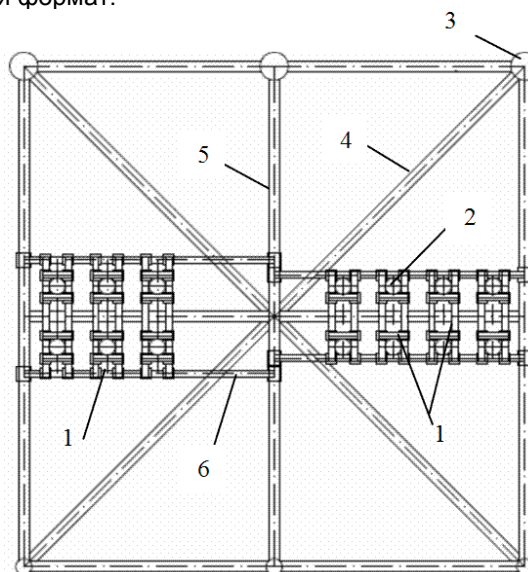


Рис. 3. Раскрепление водоотделяющих колонн с помощью жестких рам (вид в плане на диафрагму МСП): 1 – жесткие рамы; 2 – водоотделяющие колонны; 3 – вертикальные стойки опорного блока; 4 – раскосы опорного блока; 5 – распорка опорного блока; 6 – фундамент жесткой рамы

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 и References пишутся в одну колонку без переносов**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.

References

Список литературы на русском языке должен быть представлен и в романском алфавите (латинице), то есть, транслитерирован, (транслитерация – это побуквенная передача текста, написанного с помощью русского алфавита, средствами латинского алфавита), список литературы на других языках должен быть приведен на языке оригинала.

Вся транслитерация списка литературы должна быть выполнена в соответствии с системой Госдепартамента США, которая в настоящее время является наиболее распространенной.

Автоматизировать процесс транслитерации можно, воспользовавшись программным обеспечением, которое доступно по адресу www.translit.ru (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 vozrozhdeniyu: prichiny i posledstviya razrusheniya 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: Friktionnyye

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 согласны с тем, что редакция имеет право на литературное редактирование и доведение статьи до редакторских стандартов, принятых в рамках журнала.

Авторы разрешают публикацию статьи в открытом доступе на электронных ресурсах в PDF-формате и прилагают лицензионный договор от каждого автора(соавтора) статьи.

Подпись

<Дата>

Шаблон рецензии

В редакцию журнала
" МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ "
190008 г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д. 3

РЕЦЕНЗИЯ

Статья: <Заголовок статьи>.
Статья:<Фамилии И.О. авторов>

I. Информация для редакции

1. Соответствие статьи тематике журнала:
 - статья соответствует тематике журнала (да/нет)
 - если нет, то какие альтернативные журналы могут быть предложены авторам для рассмотрения?
2. Оригинальность и значимость результатов статьи (да/нет/другие оценки):
 - результаты оригинальны
 - результаты имеют научную значимость
 - результаты имеют практическую значимость
3. Качество изложения материала статьи (да/нет/другие оценки):
 - является ли аннотация достаточно информативной
 - понятность изложения статьи
 - следует ли сократить размер статьи
 - ясно ли указана цель статьи
 - адекватно ли определено место статьи в круге других работ
 - можно ли понизить степень подробности математических выкладок
 - адекватен ли список цитированной литературы
 - все ли рисунки и таблицы уместны
 - имеются ли ошибки и технические погрешности
 - строгость изложения математических и экспериментальных результатов
 - достаточно ли обоснованы результаты и выводы статьи
4. Заключение (да/нет)
 - статья может быть принята для публикации без доработки
 - статья требует доработки и повторного рецензирования
 - статья не может быть принята для публикации
 - статью следует передать другому специалисту на рецензирование
5. Замечания и рекомендации по статье для членов редколлегии

Должность, ученое звание и научная степень

<Дата>

<Подпись рецензента>

II. Замечания и рекомендации по статье для авторов

Лицензионный договор № _____

г. Санкт-Петербург

«__» _____ 20 ____ года

Общество с ограниченной ответственностью «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» (ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»), именуемое в дальнейшем "Лицензиат", в лице заместителя генерального директора-главного редактора научного журнала «МОРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» Никитин Николая Васильевича, действующего на основании Доверенности № 1-59, удостоверенной нотариусом Санкт-Петербурга Володиным А.В. 21.01.2014г, с одной стороны, и Гражданин РФ _____, именуемый в дальнейшем "Лицензиар", с другой стороны, именуемые в дальнейшем "Сторона/Стороны", заключили настоящий договор (далее - "Договор") о нижеследующем.

1. Предмет Договора

1.1. По настоящему Договору Лицензиар на безвозмездной основе предоставляет Лицензиату право использования _____,

(наименование, характеристика передаваемых материалов)

именуемого в дальнейшем "Произведение", на основе неисключительной лицензии в обусловленных Договором пределах и на определенный Договором срок.

1.2. Лицензиар гарантирует, что он обладает исключительными авторскими правами на передаваемое Лицензиату Произведение.

2. Права и обязанности Сторон

2.1. Лицензиар предоставляет Лицензиату на весь срок действия исключительных прав на Произведение следующие права:

2.1.1. право на воспроизведение Произведения (опубликование, обнародование, дублирование, тиражирование или иное размножение Произведения) без ограничения тиража экземпляров. При этом каждый экземпляр Произведения должен содержать имя автора Произведения;

2.1.2. право на распространение Произведения любым способом;

2.1.3. право на включение в составное произведение;

2.1.4. право на доведение до всеобщего сведения;

2.1.5. на использование метаданных (название, имя автора (правообладателя), аннотации, библиографические материалы и пр.) Произведений путем распространения и доведения до всеобщего сведения, обработки и систематизации, а также включения в различные базы данных и информационные системы.

2.1.6. право переуступить на договорных условиях частично или полностью полученные по настоящему договору права третьим лицам без выплаты Лицензиару вознаграждения.

2.2. Лицензиар передает права Лицензиату по настоящему Договору на основе неисключительной лицензии.

2.3. Лицензиар, в течение трех рабочих дней обязан предоставить Лицензиату Произведение в электронной версии в формате инструкции по подготовке статей для научного журнала «Морские интеллектуальные технологии» 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
Расч.счет: 40702810700000000032
БАНК «Таврический» (ОАО),
г. Санкт-Петербург,
БИК – 044030877
корр. счет 30101810700000000877.

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
Расч.счет: 40702810700000000032
БАНК «Таврический» (ОАО),
г. Санкт-Петербург,
БИК – 044030877
корр. счет 30101810700000000877.

Лицензиар:

Лицензиат
Заместитель Генерального директора
ООО «НИЦ «МОРИНТЕХ»

_____/Никитин Н.В./

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**